



**Carlos Daniel Borges  
Coelho**

**Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para  
Diferentes Intervenções de Defesa Costeira**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes, Professor Catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e co-orientação do Doutor José Claudino de Pinho Cardoso, Professor Associado da Universidade de Aveiro.





**o júri**  
presidente

Prof. Doutor João Manuel Nunes Torrão  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes  
professor catedrático da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof<sup>a</sup>. Doutora Celeste de Oliveira Alves Coelho  
professora catedrática da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real  
professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José Claudino de Pinho Cardoso  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto  
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor António Alexandre Trigo Teixeira  
professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa



## **agradecimentos**

O presente trabalho resulta da conjugação de diversos apoios e incentivos dados ao autor, que desta forma, pretende expressar o seu agradecimento e reconhecimento a todos os que contribuíram para a elaboração da dissertação.

O professor Fernando Veloso Gomes, que além de se mostrar sempre disponível na orientação científica do trabalho, demonstrou também enorme compreensão e amizade.

O professor Claudino Cardoso, na representação do departamento de engenharia civil, pelos meios disponibilizados, e de todos os colegas da secção autónoma de engenharia civil da Universidade de Aveiro, que com paciência, animaram, motivaram e apoiaram. Em especial, a saudosa Ana Maria, que com certeza seria feliz por ver concluído este trabalho e o Sr. Raul, que realizou no laboratório, todas as análises granulométricas necessárias à caracterização da dimensão dos sedimentos.

A Esmeralda Miguel, que desde o Porto, disponibilizou sempre todos os meios para que o trabalho prosseguisse, sempre amiga e incentivando, fazendo também a necessária ligação com o professor Veloso Gomes.

O Hugo Rodrigues, que de forma desinteressada desenvolveu e disponibilizou um algoritmo compatível com a saída gráfica do modelo de cálculo automático criado.

O Joaquim Barbosa, a Márcia Cabarrão, a Luciana das Neves, o Paulo Baptista, a Sónia Rey, o Jorge Almeida e a Fátima Alves, com quem se mantiveram algumas conversas sobre os temas aqui abordados, resultando sempre frutuosa troca de informação.

O concurso n.º 2/5.3/PRODEP/2001 – Formação Avançada de Docentes do Ensino Superior, pelo apoio financeiro concedido.

Todos os familiares e amigos que diariamente contribuíram com toda a paciência e a compreensão, em especial, aos pais e irmãos.

Muito obrigado



## resumo

Esta dissertação aborda um tema que frequentemente é referido na comunicação social durante os Invernos Portugueses... a dinâmica do litoral costeiro e em particular, a sua erosão. Este fenómeno pode causar avultados prejuízos, com particular incidência nas frentes urbanas, colocando em risco pessoas e bens e gerando por isso atenções especiais.

Para minorar os efeitos da natural dinâmica das zonas costeiras é necessário compreender os diversos processos envolvidos. A classificação da costa em termos de vulnerabilidades e riscos só será possível quando a capacidade de previsão for melhorada. Nessa altura os meios de planeamento terão também a sua missão facilitada.

Assim, são caracterizadas as acções que se relacionam com o evoluir dos sistemas costeiros. As acções naturais, como as marés, os ventos e a agitação marítima são avaliadas em detalhe. O Homem é também interveniente activo nos processos costeiros, podendo referir-se a construção de aproveitamentos hidráulicos que enfraquecem o fornecimento de sedimentos ao meio costeiro, as dragagens em canais de navegação, a extracção de areias e a urbanização sobre sistemas dunares, com consequências no litoral.

Os processos de transporte sedimentar são resultado das acções referidas. O transporte sólido longitudinal divide-se em partículas transportadas por arrastamento junto ao fundo e por sedimentos em suspensão, ambas de difícil quantificação. A avaliação do comportamento dos perfis transversais de praia está também relacionada com o transporte.

Os modelos de configuração de linha de costa pretendem projectar a posição futura da zona litoral. Face ao conhecimento actual, essa previsão é difícil. O desenvolvimento de um modelo próprio pretende ser uma aproximação de resultados a valores mais fiáveis, testando a sensibilidade e o comportamento de diversos parâmetros importantes na dinâmica costeira.

Numerosas aplicações à região costeira a Sul da barra de Aveiro demonstram as dificuldades sentidas actualmente, permitindo algumas conclusões. O volume sólido disponível na região é actualmente deficitário em relação às capacidades de transporte, sendo previsível o agravar de situações de erosão.

A definição de uma metodologia eficaz de classificação de vulnerabilidades e riscos em zonas costeiras é ainda limitada, sendo este trabalho um contributo na obtenção desses objectivos.



## abstract

This dissertation approach is based on a theme which is often referred by the *media* during the Portuguese winter time events... the coastal littoral dynamics and, particularly, its erosion processes. This phenomenon may cause serious damage, especially in the urban fronts, jeopardizing people and assets, and therefore generating special attention.

To diminish the effects of the coastal areas' natural dynamics it is necessary to understand the various processes involved. The classification of the coast in terms of vulnerability and risk will only be possible when the foresight ability is improved. In this way, then, the planning and decision making processes will have its mission made easier.

Hence, the actions related to the evolution of coastal systems are characterized. Natural actions, such as tides, winds and sea agitation are evaluated in detail. Mankind is also an active participant in coastal processes and we could mention the construction of hydraulic dams that weaken the sediments supply to the coastal environment, the dredging in navigation channels, the sand extractions and the urbanization on dune systems, with consequences on the littoral.

The sediment transport processes are the result of the actions mentioned above. The longitudinal sediment transport divides itself in particles transported by dragging near the bottom and suspending sediments, both difficult to quantify. The evaluation of beach cross-shore profiles' behaviour is also related with the transport.

The models of coastal line configuration claim to plan the future position of the littoral area. In view of current knowledge, that foresight is difficult. The development of a proper model wishes to be a result approximation to more trustworthy values, testing the sensitivity and behaviour of several important parameters in coastal dynamics.

Some conclusions are drawn after numerous applications to the coastal region south of Aveiro inlet demonstrate the difficulties felt nowadays. The sediment volume available in the area is currently deficient when related to the transport capacity, and it is predictable that the erosion situations will be further aggravated.

The definition of an effective vulnerability and risk classification methodology is still limited and requires all the possible inputs. This project is a contribution in pursuing such purposes.





## ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	
Resumo	
Abstract	
Índice Geral	xi
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tabelas	xxv
Lista de Símbolos	xxxí
<b>1 Introdução</b>	<b>3</b>
1.1 Enquadramento do Problema	3
1.2 Objectivos do Trabalho	9
1.3 Metodologia	10
<b>2 Vulnerabilidades e Riscos Associáveis às Acções Energéticas do Mar</b>	<b>15</b>
2.1 Métodos e Estratégias de Análise	16
2.1.1 Metodologia “IPCC Commom Methodology (CM)”	17
2.1.2 “Aerial Videotape-Assisted Vulnerability Analysis (AVVA)”	18
2.1.3 Técnica SMART	20
2.1.4 Método de Nicholl’s	22
2.1.5 Metodologia “U.S. Country Studies Program”	23
2.1.6 Análises de Simm e Cruickshank (1998)	24
2.1.7 Metodologia Veloso-Gomes	27
2.1.8 “Carta de Risco do Litoral” (CRL, 1998)	30
2.2 Questões Chave na Avaliação de Vulnerabilidades e Riscos	32
2.2.1 Parâmetros de Vulnerabilidade	33
2.2.1.1 Topografia	33
2.2.1.2 Distância à linha de costa	34
2.2.1.3 Geologia	35
2.2.1.4 Geomorfologia	37
2.2.1.5 Revestimento do solo	37
2.2.1.6 Amplitudes de maré	38
2.2.1.7 Alturas de onda significativa	39
2.2.1.8 Análise temporal das taxas de erosão e acreção	40

2.2.1.9 Acções antropogénicas	41
2.2.2 Parâmetros de Risco	43
2.2.2.1 Riscos humanos	44
2.2.2.2 Riscos económicos	45
2.2.2.3 Riscos ambientais	46
2.2.2.4 Riscos patrimoniais	46
2.2.3 Classificação de Vulnerabilidades e Riscos	47
2.2.4 Estratégias de Controlo de Riscos	49
 <b>3 Acções Naturais e Antropogénicas Condicionantes na Evolução Fisiográfica das Faixas Costeiras</b>	 53
3.1 Acções Naturais	53
3.1.1 Marés	53
3.1.1.1 Marés astronómicas	54
3.1.1.2 Marés meteorológicas	57
3.1.2 Subida Generalizada do Nível Médio das Águas do Mar	59
3.1.3 Ventos	61
3.1.4 Agitação Marítima	69
3.1.4.1 Rumos dominantes	75
3.1.4.2 Alturas e períodos de onda	79
3.1.5 Relação Entre Ventos e Agitação Marítima	88
3.1.6 Fenómenos de Alteração da Agitação na Propagação em Direcção à Costa	91
3.1.6.1 Modelos de propagação da agitação marítima	96
3.2 Acções Antropogénicas	100
3.2.1 Actividades Potencialmente Geradoras da Evolução da Linha de Costa	100
3.2.1.1 Aproveitamentos hidráulicos	101
3.2.1.2 Quebramares e canais de navegação	103
3.2.1.3 Dragagens e extracção de areias	105
3.2.1.4 Destruição e danificação de cordões dunares	107
3.2.1.5 Urbanização (construções nas zonas de interacção fisiográfica)	108
3.2.2 Intervenções de Defesa das Zonas Costeiras	110
3.2.2.1 Intervenções de manutenção da posição da “linha de costa”	112
3.2.2.2 Intervenções de alimentação e reperfilamento das praias	119

<b>4 Processos de Transporte Sedimentar</b>	<b>127</b>
4.1 Elementos Sobre a Água do Mar e os Sedimentos	127
4.1.1 Propriedades da Água do Mar	127
4.1.2 Propriedades dos Sedimentos da Costa	129
4.1.3 Velocidade de Queda das Partículas	130
4.1.4 Parâmetro Adimensional de Shields	135
4.1.5 Tensão Tangencial Crítica Junto ao Fundo	136
4.2 Processos de Transporte Sólido Longitudinal	138
4.2.1 Aspectos Físicos e Sedimentológicos	139
4.2.2 Transporte por Correntes Junto ao Fundo	146
4.2.2.1 Modelo de Meyer-Peter e Müller (1948)	146
4.2.2.2 Modelo de Frijlink (1952)	148
4.2.2.3 Modelo de Bagnold (1966)	148
4.2.3 Transporte Total Devido ao Efeito das Correntes	149
4.2.3.1 Modelo de Bagnold (1966)	150
4.2.3.2 Modelo de Eugelund-Hansen (1967)	150
4.2.3.3 Modelo de Ackers-White (1973)	150
4.2.4 Transporte Total Devido ao Efeito das Ondas e das Correntes	152
4.2.4.1 Modelo de Rijn (1984)	152
4.2.4.2 Modelo de Soulsby e Rijn	158
4.2.5 Análise de Sensibilidades	160
4.2.6 Comparação Entre Modelos	165
4.2.7 Conclusões	169
4.3 Processos de Transporte Sólido Transversal	170
4.3.1 Inclinação da Face da Praia	172
4.3.2 Perfil Activo	175
4.3.3 Perfil de Equilíbrio	178
4.3.4 Regra de Bruun	185
4.3.5 Indicadores de Previsão de Erosão ou Acreção	187
4.4 Avaliação do Potencial de Transporte Sólido Longitudinal	191
4.4.1 Fórmula CERC	191
4.4.2 Kamphuis	194
4.4.3 Distribuição Transversal do Transporte Sólido Longitudinal	195

<b>5 Modelos de Configuração da “Linha de Costa”</b>	201
5.1 Modelos para Praias Enclausuradas	201
5.1.1 Modelo em Forma de Parábola	203
5.1.2 Modelo em Forma de Espiral Logarítmica	204
5.1.3 Modelo em Forma de Espiral Parabólica	206
5.1.4 Modelo em Forma de Espiral Polinomial	208
5.1.5 Modelo em Forma de Espiral Logarítmica e Trecho Rectilíneo Tangente	210
5.1.6 Modelo de Pelnard-Considére	210
5.1.7 Discussão	213
5.2 Modelação Numérica da Linha de Costa	218
5.2.1 GENESIS	220
5.2.2 LITMOD	221
5.3 Modelo LTC (Long-Term Configuration)	222
5.3.1 Introdução	223
5.3.2 Descrição das Subrotinas	226
5.3.3 Testes de Comportamento e de Sensibilidade do Modelo	254
5.3.4 Dúvidas e Lacunas	286
5.4 Comparação Entre Modelos	288
<b>6 Aplicações à Faixa Costeira da Ria de Aveiro</b>	299
6.1 Referências à Dinâmica Litoral da Região de Aveiro	299
6.2 Breve História das Intervenções de Defesa Costeira Efectuadas	303
6.2.1 Esporões e Obras Aderentes	303
6.2.2 Alimentação Artificial das Praias e Zonas Submersas Próximas com Areias Provenientes das Dragagens	306
6.2.3 Restabelecimento Artificial do Transporte Aluvionar aos Quebramares	307
6.2.4 Outras Intervenções	307
6.3 Balanço Sedimentar em Células Costeiras	308
6.3.1 Valores de Transporte Sedimentar	308
6.4 Abordagem do Problema de Vulnerabilidades e Riscos em Portugal	312
6.4.1 “Carta de Risco” no Trecho Barra-Vagueira	313
6.4.2 Riscos da Subida do Nível do Mar	317
6.4.3 Aplicação da Matriz de Classificação de Vulnerabilidades e Riscos	318
6.5 Cenários de Agitação	322
6.6 Projecção da Agitação Local	325

6.7 Dados Sobre a Granulometria dos Sedimentos	336
6.8 Comportamento dos Perfis Transversais	342
6.8.1 Inclinações da Praia	347
6.8.2 Perfis de Equilíbrio	348
6.8.3 Estimativa do Recuo da Linha de Costa por Subida do Nível do Mar	349
6.9 Avaliação do Potencial de Transporte Sólido	352
6.10 Aplicação dos Modelos de Linha de Costa a Sul da Barra de Aveiro	357
6.11 Aplicações do Modelo LTC	364
 <b>7 Considerações Finais</b>	 379
7.1 Síntese de Resultados	379
7.2 Conclusões	388
7.3 Desenvolvimentos Futuros	391
 Referências Bibliográficas	 395



## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1.1: Enquadramento da avaliação de riscos de exposição de frentes urbanas.	4
Figura 1.2: Esquema dos principais aspectos que se relacionam com as evoluções morfológicas e essencialmente, com a erosão costeira.	5

### Capítulo 2

Figura 2.1: Exemplo de definição de probabilidades por ramificação de eventos (adaptado de Simm e Cruickshank, 1998).	27
---	----

### Capítulo 3

Figura 3.1: Caracterização de uma maré semi-diurna típica.	54
Figura 3.2: Efeito da maré com imersão da praia, em frente à escola primária de Cortegaça, Ovar.	55
Figura 3.3: Representação de conceitos relativos a marés (adaptado de ANC, 2003).	56
Figura 3.4: Flutuação do nível médio das águas do mar nos últimos 40000 anos, onde a curva a traço largo corresponde a dados mais limitados (adaptado de Komar, 1976).	60
Figura 3.5: Velocidade média do vento, proveniente de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).	63
Figura 3.6: Frequências de ocorrência de vento de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).	64
Figura 3.7: Rosa de rumos com a representação das classes de direcção de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).	76
Figura 3.8: Distribuição da direcção de ondulação ao longo dos anos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).	77
Figura 3.9: Comparação da direcção média anual de ondulação com as situações de temporal persistente (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).	78
Figura 3.10: Distribuição mensal da direcção média de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).	79
Figura 3.11: Alturas de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).	80

Figura 3.12: Distribuição mensal das alturas de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).	81
Figura 3.13: Período de onda médio (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).	82
Figura 3.14: Distribuição mensal do período de onda médio (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).	83
Figura 3.15: Relação entre alturas de onda significativa e respectivos períodos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).	85
Figura 3.16: Comparação entre a proveniência de ventos média anual (baseado em todos os dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002) e a que origina situações de alturas de ondas elevadas, com persistência de pelo menos 8 h.	91
Figura 3.17: Representação esquemática de fenómenos de alteração da propagação da agitação.	92
Figura 3.18: Esquema de estruturas paralelas à costa.	112
Figura 3.19: Obras longitudinais aderentes, em Cortegaça e Esmoriz.	113
Figura 3.20: Exemplo de Cortegaça, onde é evidente a formação de um pequeno cabo originado pelo efeito de contenção local da obra de defesa aderente (foto retirada de EUrosion, 2003).	114
Figura 3.21: Remate de uma extremidade livre da obra de protecção da Vagueira.	115
Figura 3.22: Esquema de estruturas perpendiculares à costa.	116
Figura 3.23: Esporão isolado e esporão em continuidade com revestimento longitudinal.	117
Figura 3.24: Transporte sólido longitudinal na secção de implantação de uma estrutura perpendicular à costa (adaptado de Oliveira, 1997).	118
Figura 3.25: Esquema de intervenções de alimentação e reperfilamento das praias.	119
Figura 3.26: Artificialização das dunas na restinga Sul da ria de Aveiro.	122
Figura 3.27: Plantação de vegetação em dunas e colocação de paliçadas, como formas de retenção de areias.	123
Figura 3.28: Acessos pedonais às praias e painéis de informação sobre a importância das dunas.	124

## Capítulo 4

Figura 4.1: Variabilidade da dimensão dos sedimentos de uma praia, em período de maré baixa.	129
Figura 4.2: Velocidade de queda de partículas em suspensão.	133
Figura 4.3: Classificação das praias em função da velocidade de queda adimensional.	134



Figura 4.4: Parâmetro de Shields.	136
Figura 4.5: Escoamento com um ângulo $\psi$ em relação ao fundo inclinado de um ângulo $\beta$ .	137
Figura 4.6: Tensão tangencial crítica.	137
Figura 4.7: Processos de transporte longitudinal.	138
Figura 4.8: Esquema da variação de concentração de sedimentos e das velocidades em profundidade (adaptado de Rijn, 1989).	141
Figura 4.9: Variação do comprimento de onda em função do período, para profundidade constante.	145
Figura 4.10: Variação do comprimento de onda em função da profundidade, para período constante.	146
Figura 4.11: Carga sedimentar transportada para diferentes profundidades.	162
Figura 4.12: Carga sedimentar transportada. Velocidade de corrente de 0.3 m/s; Profundidade de 5 m.	163
Figura 4.13: Carga sedimentar transportada. Velocidade de corrente de 0.3 m/s; Profundidade de 10 m.	163
Figura 4.14: Carga sedimentar transportada. Velocidade de corrente de 1.0 m/s; Profundidade de 5 m.	164
Figura 4.15: Carga sedimentar transportada. Velocidade de corrente de 1.0 m/s; Profundidade de 10 m.	164
Figura 4.16: Carga sedimentar transportada junto ao fundo por acção das correntes.	166
Figura 4.17: Carga sedimentar total transportada por acção das correntes.	167
Figura 4.18: Carga sedimentar total transportada por acção conjunta de ondas e correntes.	168
Figura 4.19: Situações típicas de perfis transversais, onde são importantes os processos de transporte sedimentar transversal (adaptado de Dean <i>et al.</i> , 2002).	171
Figura 4.20: Alteração continuada dos perfis transversais nas proximidades do esporão do Areão, imediatamente após a construção do mesmo (levantamentos fornecidos por Sónia Rey, e realizados no âmbito do projecto CROP - PDCTM/P/MAR/15265/1999).	172
Figura 4.21: Variação da inclinação das praias com o diâmetro médio dos sedimentos, para diferentes alturas de onda.	174
Figura 4.22: Representação adimensional do perfil de equilíbrio em função do expoente $m$ (baseado em Cowell <i>et al.</i> , 1999).	180
Figura 4.23: Comparação entre diferentes propostas de determinação do parâmetro $A$ .	183
Figura 4.24: Perfil de equilíbrio, com duas secções (adaptado de Bernabeu <i>et al.</i> , 2003).	184
Figura 4.25: Efeito da subida do nível médio da água do mar na erosão costeira, segundo Bruun (adaptado de Komar, 1976).	186

Figura 4.26: Acreção ou erosão das praias, dependendo da dimensão dos sedimentos e do clima de agitação (Coelho e Veloso-Gomes, 2004).	189
Figura 4.27: Previsão da probabilidade de erosão ou acreção de uma praia ao longo do ano, com base no clima de agitação, registado na bóia de Leixões.	190
Figura 4.28: Variação do coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ) com a granulometria das areias.	193
Figura 4.29: Esquema da distribuição transversal do transporte longitudinal de sedimentos (retirado de IHRH, 1992).	196
Figura 4.30. Distribuição transversal do transporte longitudinal ao longo da largura activa do perfil.	197

## Capítulo 5

Figura 5.1: Parábola definida por Mashima (adaptado de Sweers, 1999).	203
Figura 5.2: Esquema tipo de espiral logarítmica (adaptado de HP, 1981b).	205
Figura 5.3: Valores da constante espiral $\alpha$ , em função do ângulo de incidência da ondulação $\beta$ e valores do “índice de recorte” da linha do litoral $r$ , em função do ângulo $\beta$ (adaptado de HP, 1981b).	205
Figura 5.4: Esquema tipo de espiral parabólica (adaptado de Rosati <i>et al.</i> , 2002).	206
Figura 5.5: Esquema tipo da localização do ponto de máximo recorte da costa.	207
Figura 5.6: Valores dos coeficientes da forma de espiral polinomial, em função do ângulo $\beta$ (adaptado de Rosati <i>et al.</i> , 2002).	209
Figura 5.7: Esquema tipo de espiral logarítmica e recta tangente (adaptado de HP, 1981b).	210
Figura 5.8: Referencial na aplicação do modelo de Pelnard-Considére.	211
Figura 5.9: Modelos de configuração da linha de costa em equilíbrio estático, aplicados a Sul de Lisboa.	213
Figura 5.10: Organigrama da sequência de cálculo do modelo LTC.	223
Figura 5.11: Representação esquemática da formulação de base nos modelos de uma linha e no modelo LTC.	225
Figura 5.12: Esquema com as características de referência do modelo LTC.	230
Figura 5.13: Indicação dos limites a introduzir na definição de uma maré do tipo TMT = 2.	239
Figura 5.14: Resultado do nível médio da água do mar para a associação das diferentes hipóteses de conjugação de marés astronómicas e meteorológicas.	240
Figura 5.15: Propagação das ondas para rumos ao largo de 90°, 75° e 45° com o Norte.	246
Figura 5.16: Variáveis utilizadas na caracterização da difracção, num ponto P, localizado na zona abrigada de uma obra de defesa transversal (esporão ou quebramar).	247

Figura 5.17: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes espaçamentos entre pontos da grelha modelada.	257
Figura 5.18: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, para diferentes espaçamentos entre pontos da grelha modelada.	258
Figura 5.19: Configuração em planta da linha de costa ao longo do tempo, até ser atingida a posição de equilíbrio.	259
Figura 5.20: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, até ser atingida a configuração de equilíbrio.	259
Figura 5.21: Evolução no tempo de volumes de sedimentos e distâncias da linha de costa à posição inicial, para as secções extremas da grelha de pontos modelada.	260
Figura 5.22: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (entrada ou saída de volumes de sedimentos constantes e conhecidos).	262
Figura 5.23: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (variação conhecida dos volumes sedimentares, nas secções extremas).	263
Figura 5.24: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (extrapolação das condições de transporte sedimentar vizinhas às fronteiras).	264
Figura 5.25: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, para diferentes configurações topográficas iniciais.	266
Figura 5.26: Configuração em planta da linha de costa e delimitação das áreas activas, para diferentes considerações de cálculo.	269
Figura 5.27: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, para diferentes condições de evolução da forma dos perfis.	270
Figura 5.28: Configuração em planta da linha de costa, para as diferentes condições de evolução da forma dos perfis.	273
Figura 5.29: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes fontes aluvionares.	274
Figura 5.30: Comportamento da linha de costa após a alimentação artificial duma praia.	276
Figura 5.31: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes alimentações artificiais.	277
Figura 5.32: Comportamento da linha de costa nas proximidades de um esporão, para duas situações de proveniência da agitação.	279
Figura 5.33: Configuração em planta da linha de costa, para teste ao efeito de diferentes esporões.	280

Figura 5.34: Configuração em planta da linha de costa, para teste ao efeito de diferentes obras de defesa longitudinal.	282
Figura 5.35: Configuração em planta da linha de costa, em função de diferentes considerações de maré.	284
Figura 5.36: Perfil transversal da secção do extremo Norte, admitindo a sobreposição dos efeitos de marés astronómicas, marés meteorológicas e subida generalizada do nível médio da água do mar.	285
Figura 5.37: Configuração em planta da linha de costa, em função de diferentes considerações de agitação incidente.	286

## Capítulo 6

Figura 6.1: Estádios da formação e evolução da laguna de Aveiro desde o século X (retirado de Diogo, 2004).	301
Figura 6.2: Posição da linha de costa, com base em fotografias aéreas de 1967 e 1996, na região a Sul de Aveiro.	302
Figura 6.3: Localização dos esporões e obras aderentes, respectivamente, na região da Costa Nova e da Vagueira (retirado do EUrosion, 2003).	305
Figura 6.4: “Carta de Risco” no trecho Barra – Vagueira (retirado de CRL, 1998).	314
Figura 6.5: Representação dos elementos topográficos e batimétricos disponíveis na área de estudo.	326
Figura 6.6: Representação em planta de 40x40 km <sup>2</sup> da área de estudo, como resultado da modelação 3D do terreno, após utilização dos elementos de batimetria e topografia disponíveis.	327
Figura 6.7: Representação da altura significativa do espectro de onda, em três cenários distintos de agitação e representação vectorial da sua direcção de propagação (resultados da aplicação do modelo SWAN).	330
Figura 6.8: Rosas de rumos locais, durante a propagação das ondas até à costa. Representação em função das diferentes profundidades e para vários cenários de altura de onda (alinhamento em $y = 404000$ m).	335
Figura 6.9: Rosas de rumos locais, durante a propagação das ondas até à costa. Representação em função das diferentes profundidades e para vários cenários de altura de onda (alinhamento em $y = 386000$ m).	335
Figura 6.10: Diversas fases da operação de análise granulométrica das areias: recolhas das amostras, secagem em estufa, separação de grãos aglutinados, vibração, separação das quantidades em cada peneiro e respectiva pesagem.	338

Figura 6.11: Distribuição do diâmetro médio das areias ao longo da costa, no distrito de Aveiro, em zona de baixa-mar, em diferentes alturas do ano.	341
Figura 6.12: Relação entre o clima de agitação marítima e a dimensão das areias.	342
Figura 6.13: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos $y = 415000$ m até $y = 403000$ m).	343
Figura 6.14: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos $y = 401000$ m até $y = 389000$ m).	344
Figura 6.15: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos $y = 387000$ m até $y = 375000$ m).	345
Figura 6.16: Recuo da linha de costa para uma subida do nível médio da água do mar num horizonte de 100 anos.	351
Figura 6.17: Potencial de transporte sólido longitudinal, obtido por aplicação da fórmula CERC.	355
Figura 6.18: Potencial de transporte sólido longitudinal, obtido por aplicação da fórmula de Kamphuis.	355
Figura 6.19: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa a Sul da barra de Aveiro, função de diferentes pontos limite.	359
Figura 6.20: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre esporões da Costa Nova.	361
Figura 6.21: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre esporões da Vagueira.	361
Figura 6.22: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre a Costa Nova e a Vagueira.	363
Figura 6.23: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre a Vagueira e o Areão.	364
Figura 6.24: Resultado do modelo LTC para uma simulação a 100 anos, com $k = 0.05$ e a evolução da parte imersa dos perfis transversais admitida com inclinação nula.	368
Figura 6.25: Localização das obras de defesa (quebramares, esporões e obras longitudinais aderentes) introduzidas na modelação.	369
Figura 6.26: Representação dos resultados da simulação a cem anos, considerando as intervenções de defesa costeira existentes.	371

Figura 6.27: Comparação da evolução da linha de costa para diferentes projecções da subida do nível médio da água do mar, em cem anos.	372
Figura 6.28: Comparação da evolução da linha de costa para diferentes projecções de rumos da agitação, em cem anos.	374
Figura 6.29: Representação de um cenário de evolução da linha de costa a 25 anos, sobre uma base correspondente à fotografia aérea de 2001.	375

## ÍNDICE DE TABELAS

### Capítulo 2

Tabela 2.1: Classificação pela técnica AVVA, dos atributos naturais (Andrade e Freitas, 2002).	18
Tabela 2.2: Classificação pela técnica AVVA, dos atributos sócio-económicos (Andrade e Freitas, 2002).	19
Tabela 2.3: Índices de classificação da vulnerabilidade da costa à perda de território. O índice aumenta com o aumento das vulnerabilidades da costa (adaptado de Andrade e Freitas, 2002).	21
Tabela 2.4: Índices de classificação do valor da ocupação do solo (adaptado de Andrade e Freitas, 2002).	21
Tabela 2.5: Índices de classificação de riscos (Andrade e Freitas, 2002).	22
Tabela 2.6: Caracterização de impactes em função da geomorfologia da costa.	23
Tabela 2.7: Escala típica de probabilidades de ocorrência (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).	25
Tabela 2.8: Escala típica de consequências (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).	25
Tabela 2.9: Importância dos riscos (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).	26
Tabela 2.10: Custo dos riscos por unidade de tempo (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).	26
Tabela 2.11: Aceitabilidade dos riscos (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).	26
Tabela 2.12: Classificação da vulnerabilidade quanto a cotas topográficas.	34
Tabela 2.13: Classificação da vulnerabilidade quanto a distância à linha de costa.	35
Tabela 2.14: Classificação da vulnerabilidade quanto a características geológicas.	36
Tabela 2.15: Classificação da vulnerabilidade quanto a características geomorfológicas.	37
Tabela 2.16: Classificação da vulnerabilidade quanto a revestimento do solo.	38
Tabela 2.17: Classificação da vulnerabilidade quanto a amplitudes de maré.	38
Tabela 2.18: Classificação da vulnerabilidade quanto a alturas de onda significativa.	39
Tabela 2.19: Classificação da vulnerabilidade quanto a taxas de erosão ou acreção.	41
Tabela 2.20: Classificação da vulnerabilidade quanto a acções antropogénicas.	42
Tabela 2.21: Classificação do parâmetro de risco humano.	44
Tabela 2.22: Classificação do parâmetro de risco económico.	45
Tabela 2.23: Classificação do parâmetro de risco ambiental.	46
Tabela 2.24: Classificação do parâmetro de risco de património.	47

Tabela 2.25: Classificação e ponderação dos parâmetros de vulnerabilidade, para identificação da vulnerabilidade global. 47

Tabela 2.26: Matriz de classificação de riscos associados às acções energéticas do mar. 48

### Capítulo 3

Tabela 3.1: Valores típicos de maré em Leixões (baseado em LNEC, 1996). 57

Tabela 3.2: Limiar entre as diferentes classes de marés meteorológicas, em diferentes locais da costa portuguesa, expressa em centímetros (adaptado de Andrade e Freitas, 2002). 58

Tabela 3.3: Distribuição dos ventos de acordo com o seu rumo e respectivas velocidades médias. 62

Tabela 3.4: Frequências acumuladas da velocidade de vento ( $v$ ), referentes a cada mês do ano e ao ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002). 66

Tabela 3.5: Valores médios da velocidade de vento ( $v$ ), em m/s, por classes de rumos e respectivas frequências de ocorrência, referentes a cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002). 67

Tabela 3.6: Frequências acumuladas (% em relação ao total das 33116 observações) distribuídas por classes de rumos e de velocidade do vento (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002). 68

Tabela 3.7: Localização das estações ondógrafo de Leixões ao longo do tempo. 71

Tabela 3.8: Número total de registos efectuados nos diferentes meses do período em análise (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003). 73

Tabela 3.9: Número de registos em condições de temporal persistente, efectuados nos diferentes meses do período em análise (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003). 74

Tabela 3.10: Comparação de percentagem de ocorrências de classes de alturas de onda significativa. 84

Tabela 3.11: Número de registos para classes de alturas de onda significativa e respectivos períodos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003). 86

Tabela 3.12: Número de registos para classes de alturas de onda significativa e respectivos rumos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003). 87



Tabela 3.13: Número de registos para classes de períodos de onda e respectivos rumos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).	88
Tabela 3.14: Relação entre os rumos do clima de agitação em Leixões e os rumos de vento ao largo de Aveiro (dados do vento do Instituto de Meteorologia e dados de agitação na bóia de Leixões, do Instituto Hidrográfico, no período de Julho de 1993 a Agosto de 2002).	89
Tabela 3.15: Relação entre classes de alturas de onda em Leixões e ventos ao largo de Aveiro (dados do vento do Instituto de Meteorologia e dados de agitação na bóia de Leixões, do Instituto Hidrográfico, no período de Outubro de 1981 a Agosto de 2002).	90
Tabela 3.16: Critério de classificação do tipo de rebentação das ondas.	94
Tabela 3.17: Número de barragens com albufeiras de capacidade superior a dez milhões de metros cúbicos, localizadas em território nacional (baseado em dados do INAG, 2002).	102
Tabela 3.18: Pressão urbana exercida nos concelhos junto à costa, por comparação com cada unidade territorial (com base em dados do INE, 2002).	109

#### Capítulo 4

Tabela 4.1: Classificação das praias em função da velocidade de queda adimensional.	134
Tabela 4.2: Inclinações de praia entre a Vagueira e Poço da Cruz (retirado de Baptista <i>et al.</i> , 2004).	175
Tabela 4.3: Estimativa da profundidade de fecho dos perfis transversais, com base no clima de agitação em Leixões, registado entre 1981 e 2003.	177
Tabela 4.4: Valores recomendados de $A$ e expressos em $m^{1/3}$ (retirado de Morang e Parson, 2002).	181
Tabela 4.5: Relação entre os números adimensionais e as probabilidades de erosão ou acreção de uma praia (Kraus, 1992).	188
Tabela 4.6: Limites das alturas significativas de onda a partir dos quais há grandes probabilidades de erosão ou acreção, para diferentes granulometrias de areias (de acordo com os dados de agitação disponíveis da bóia de Leixões e uma relação linear com o período de onda respectivo).	189

#### Capítulo 5

Tabela 5.1: Valores extremos do nível médio da água do mar, obtidos no modelo, em diferentes situações de maré.	241
Tabela 5.2: Resultados da transformação da onda na sua propagação até à rebentação, por aplicação do modelo LTC.	245
Tabela 5.3: Resultados do modelo de propagação de ondas SWAN.	247

Tabela 5.4: Coeficientes de difração obtidos por aplicação do modelo LTC.	249
Tabela 5.5: Resultados nas secções extremas do modelo (secção a Norte, com erosão máxima e secção a Sul, com acreção máxima), para diferentes espaçamentos entre pontos da malha modelada.	256
Tabela 5.6: Volumes de sedimentos adicionados e retirados nas fronteiras da grelha modelada, no final de dez anos de cálculo.	265
Tabela 5.7: Resultados da variação da posição da linha de costa nas secções extremas do modelo, para diferentes considerações de cálculo.	268
Tabela 5.8: Resultados da variação de volumes de sedimentos nas secções extremas do modelo, para diferentes considerações de cálculo.	268
Tabela 5.9: Resultados nas secções extremas do modelo, para as diferentes situações apresentadas na figura 5.26, em função das inclinações adoptadas.	272
Tabela 5.10: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes fontes aluvionares.	275
Tabela 5.11: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes alimentações artificiais.	277
Tabela 5.12: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes esporões e campos de esporões.	281
Tabela 5.13: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes obras longitudinais aderentes.	282

## Capítulo 6

Tabela 6.1: Volumes de areias litorais movimentadas em ano médio (Oliveira, 1968).	309
Tabela 6.2: Classificação de parâmetros de vulnerabilidade em locais da costa Noroeste portuguesa.	318
Tabela 6.3: Classificação de parâmetros de risco em locais da costa Noroeste portuguesa.	320
Tabela 6.4: Classificação global do risco em locais da costa Noroeste portuguesa.	320
Tabela 6.5: Cenários de alturas de onda para caracterização de um ano típico de agitação.	323
Tabela 6.6: Cenários de rumos de ondulação e vento, para caracterização de um ano típico de agitação marítima.	323
Tabela 6.7: Frequências de ocorrências de ondulação em ano médio (%).	324
Tabela 6.8: Avaliação da importância do nível de maré nas características locais da onda.	328
Tabela 6.9: Avaliação da importância do período de onda nas características locais da onda.	329

Tabela 6.10: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por $H_S = 0.8$ m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).	331
Tabela 6.11: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por $H_S = 1.5$ m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).	332
Tabela 6.12: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por $H_S = 2.4$ m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).	332
Tabela 6.13: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por $H_S = 4.2$ m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).	333
Tabela 6.14: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por $H_S = 6.8$ m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).	333
Tabela 6.15: Diâmetro médio das areias, em praias do distrito de Aveiro (retirado de Pureza e Araújo, 1956).	337
Tabela 6.16: Diâmetro médio das areias em 20 locais da região do distrito de Aveiro.	339
Tabela 6.17: Características geométricas de perfis transversais, baseados na região de Aveiro.	346
Tabela 6.18: Características da agitação na rebentação, por ponderação dos diferentes cenários de ondulação local, de acordo com os resultados do SWAN, para um ano típico de agitação.	347
Tabela 6.19: Inclinações de praia obtidas com diferentes expressões (ver secção 4.3.1).	348
Tabela 6.20: Recuos da linha de costa, por aplicação da regra de Bruun, para diferentes cenários e dados de geometria de perfis transversais, baseados na região de Aveiro.	350
Tabela 6.21: Volumes potenciais de transporte sólido longitudinal na região de Aveiro, considerados positivos no sentido Norte-Sul (milhões de $m^3$ /ano).	353
Tabela 6.22: Principais parâmetros intervenientes na modelação da configuração de linha de costa em forma de espiral, adoptados para diversos trechos da costa de Aveiro.	358
Tabela 6.23: Volumes de sedimentos em transporte e taxas de recuo da linha de costa, para uma simulação com horizonte de 10 anos.	366
Tabela 6.24: Resultados de três simulações idênticas, dependendo apenas das sequências aleatórias em que foram gerados os anos típicos de agitação.	367
Tabela 6.25: Volumes médios anuais de transporte sedimentar e taxas de recuo médias anuais da linha de costa durante a aproximação ao equilíbrio, ao longo de cem anos de simulação de cálculo.	367
Tabela 6.26: Percentagem de proveniências das ondas em cada quadrante de rumos, para os três cenários de rumos modelados.	373



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Parâmetro de escala dos sedimentos [ $m^{1/3}$ ]
$A$	Coeficiente do perfil de rebentação, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$A_s$	Coeficiente que traduz a soma dos efeitos do transporte sólido em suspensão e junto ao fundo
$A_{sb}$	Coeficiente que traduz o efeito do transporte sólido junto ao fundo
$A_{ss}$	Coeficiente que traduz o efeito do transporte sólido em suspensão
$A_w$	Amplitude de pico da onda
$B$	Altura da berma emersa
$B$	Coeficiente do perfil de rebentação, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$C$	Coeficiente do perfil de baixa profundidade, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$C$	Coeficiente de Chézy, função da rugosidade relativa das partículas do fundo
$C'$	Coeficiente de Chézy, função do diâmetro das partículas do fundo
$C_D$	Coeficiente de arrastamento devido ao efeito das correntes
$C_{gb}$	Velocidade do grupo de ondas na rebentação
$C_i$	Coeficientes geométricos para determinação da configuração da linha de costa em forma de espiral polinomial
$C_i$	Coeficientes empíricos, base da determinação do coeficiente de difracção
$CL$	Teor de cloretos presentes na água do mar
$D$	Coeficiente do perfil de baixa profundidade, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$D^*$	Parâmetro adimensional de dimensão dos sedimentos
$D_{Tp}$	Direcção média das ondas associadas ao período de pico
$F_c$	Factor de correcção relacionado com as correntes
$F_w$	Factor de correcção relacionado com as ondas
$H_b$	Altura de onda na rebentação
$H_S$	Altura de onda significativa
$K_d$	Coeficiente de difracção da onda
$K_R$	Coeficiente de refracção da onda
$K_S$	Coeficiente de empolamento da altura de onda, na rebentação
$L$	Comprimento de onda
$L_0$	Comprimento de onda ao largo
$L_b$	Comprimento de onda na rebentação

$L_i$	Comprimento de onda no ponto de encontro da onda com um obstáculo
$N_0$	Número adimensional de Dean
$P$	Parâmetro de perfil
$Q_t$	Volume potencial de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo
$R$	Recuo da linha de costa por subida do nível do mar
$R_0$	Distância entre dois pontos “fixos” da costa
$R_e$	Componente de $R$ paralela à direcção de propagação das ondas, no modelo de configuração da linha de costa em forma de espiral parabólica
$R_i$	Raios dos modelos de espiral, para configurações de linha de costa em planta
$R_{u2\%}$	Elevação da água no espraçamento da onda, medido na vertical e excedido 2% das vezes
$S$	Salinidade da água do mar, expressa em permilagem
$S$	Subida do nível do mar
$S_0$	Declividade da onda em águas profundas
$T$	Período de onda
$T'$	Parâmetro adimensional de excesso de tensões tangenciais no fundo
$T_b$	Período de onda na rebentação
$Te$	Temperatura da água do mar, expressa em graus centígrados
$T_{Hs}$	Período de onda correspondente à média dos períodos das ondas utilizadas no cálculo da altura de onda significativa
$T_n$	Parâmetro utilizado no cálculo da velocidade orbital média quadrática, função de $g$ e $h$
$T_P$	Período de pico das ondas
$T_s$	Parâmetro de transporte sedimentar
$T_z$	Período relacionado com o período de onda
$U_w$	Velocidade orbital da onda
$W$	Largura total do perfil transversal activo
$W_1$	Largura emersa do perfil transversal, medida até à cota máxima da berma
$W_2$	Largura submersa do perfil transversal activo
$Y$	Comprimento do esporão
$ZC$	Número de suspensão relacionado com correntes
$ZW$	Número de suspensão relacionado com ondas
$a$	Altura junto ao fundo onde a concentração de sedimentos se admite constante
$b$	Máxima distância da linha de costa à recta que une dois pontos “fixos” da costa
$c$	Concentração de sedimentos em suspensão na água do mar

$c_z$	Concentração de sedimentos em suspensão à cota $z$
$c_a$	Concentração de sedimentos numa altura $a$ junto ao fundo (expresso em relação de volumes)
$d_{50}$	Dimensão média dos sedimentos
$d_{50,s}$	Dimensão média dos sedimentos em suspensão
$d_b$	Profundidade de rebentação das ondas
$e_b$	Factor de eficiência de Bagnold, relacionado com o transporte sólido junto ao fundo
$e_s$	Factor de eficiência de Bagnold, relacionado com o transporte sólido em suspensão
$f_a$	Coefficiente de Bagnold, em função da rugosidade aparente
$f_c$	Factor de fricção devido à acção das correntes, função da rugosidade relativa das partículas do fundo
$f'_c$	Factor de fricção devido à acção das correntes, função do diâmetro das partículas do fundo
$f_w$	Factor de fricção devido à acção das ondas
$g$	Aceleração da gravidade (9.81 m <sup>2</sup> /s)
$h$	Profundidade
$h_a$	Máxima profundidade em que o perfil satisfaz os pressupostos de baixas profundidades, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$h_c$	Profundidade activa do perfil transversal
$h_r$	Profundidade do ponto de descontinuidade do perfil, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$k$	Número de onda
$k$	Coefficiente de proporcionalidade empírico e adimensional, aplicado na fórmula CERC
$k$	Constante aplicada na determinação da forma de equilíbrio dos perfis transversais, função das características geométricas dos perfis
$k_a$	Rugosidade aparente
$k_b$	Índice de rebentação
$k_i$	Parâmetros do modelo de Ackers-White, dependentes principalmente da granulometria dos sedimentos do fundo
$k_{s,c}$	Rugosidade relativa das partículas do fundo, no que respeita ao efeito das correntes
$m$	Inclinação da praia
$m$	Factor de forma dos perfis transversais, função do tipo de dissipação da praia
$n$	Porosidade dos sedimentos (aproximadamente igual a 0.4)
$p$	Parâmetro interveniente no cálculo do número de onda
$p$	Coefficiente aplicado à coordenada $x$ do sistema ortogonal de referência $XY$ , no modelo de configuração de linha de costa em forma de parábola

$q_b$	Transporte de carga sólida junto ao fundo
$q_{b,c}$	Transporte de carga sólida junto ao fundo, originado por correntes
$q_c$	Transporte de carga sólida, originado por correntes
$q_s$	Transporte de carga sólida em suspensão
$q_{s,c}$	Transporte de carga sólida em suspensão, originado por correntes
$q_t$	Transporte total de carga sólida, originado por correntes e ondas
$r$	“Índice de recorte” da linha do litoral
$r$	Raiz quadrada do coeficiente de correlação, em curvas de aproximação a pontos
$r$	Distância ao ponto de difracção das ondas
$s$	Relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e da água do mar
$t$	Tempo passado após o início de enchimento de um esporão
$t_2$	Tempo passado após o enchimento total do esporão
$t_f$	Tempo total de enchimento de um esporão
$u^*$	Velocidade de fricção da corrente junto ao fundo
$u^*,c$	Velocidade de corrente tangente ao fundo
$u_c$	Valor médio em profundidade da velocidade de corrente
$u_{cr}$	Velocidade de corrente crítica
$u_{c,z}$	Velocidade de corrente à cota $z$
$u_{mb}$	Velocidade orbital média quadrática, na rebentação
$u_{rms}$	Velocidade orbital média quadrática no fundo
$u_\delta$	Velocidade de corrente à cota $\delta_s$
$v$	Velocidade do vento
$x$	Distância na transversal, medida desde a linha de costa em nível médio (cota +2.0 m ZH)
$x$	Abcissa da posição da linha de costa, nos modelos de configuração de linha de costa em planta
$x_0$	Distância horizontal entre o começo do perfil transversal e a origem virtual do perfil de baixas profundidades, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$x_a$	Largura do perfil de equilíbrio, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$x_r$	Distância horizontal entre o começo do perfil transversal e o ponto de descontinuidade, no modelo de perfil de equilíbrio com duas secções
$y$	Parâmetro interveniente no cálculo do número de onda
$y$	Ordenada da posição da linha de costa, nos modelos de configuração de linha de costa em planta
$z$	Cota, em profundidade
$z_0$	Comprimento da rugosidade do fundo submerso



$\Delta$	Altura das formas dos fundos submersos
$\Delta t$	Intervalo de tempo no cálculo da variação de volume no trecho $\Delta y$ , no modelo LTC
$\Delta V$	Variação de volume no trecho $\Delta y$ e no intervalo de tempo $\Delta t$ , no modelo LTC
$\Delta y$	Comprimento dos trechos discretos da linha de costa, no modelo LTC
$\Delta z$	Variação uniforme da cota em toda a largura activa do perfil transversal, no modelo LTC
$\Omega$	Velocidade de queda adimensional
$\alpha$	Constante espiral (ângulo entre a tangente à espiral num ponto e o raio nesse ponto)
$\alpha$	Ângulo entre a crista da onda e a linha de costa
$\alpha_0$	Ângulo entre a crista da onda ao largo e a linha de costa
$\alpha_l$	Coefficiente interveniente no cálculo do número de suspensão relacionado com ondas, para definição do transporte de carga sólida em suspensão
$\alpha_b$	Ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa
$\alpha_{br}$	Coefficiente de rebentação das ondas
$\alpha_L$	Ângulo entre a linha de referência e o Norte, nos modelos de configuração da linha de costa
$\alpha_N$	Ângulo entre a linha de costa e o Norte
$\alpha_{w,c}$	Coefficiente de interacção entre ondas e correntes
$\beta$	Ângulo da inclinação da praia submersa em relação a um plano horizontal
$\beta$	Ângulo entre a crista da onda dominante e a linha de referência, nos modelos de configuração da linha de costa em forma de espiral
$\beta_l$	Factor de difusão das partículas no fluido e das partículas isoladas
$\gamma$	Ângulo entre a crista da onda dominante e o Norte
$\gamma$	Ângulo entre a ortogonal à crista das ondas na zona de sombra de uma obra de defesa e a orientação da obra de defesa
$\gamma_l$	Ângulo entre a ortogonal à crista das ondas ao largo e a orientação da obra de defesa
$\gamma_{w,c}$	Parâmetro de relação entre os ângulos de ondas e correntes
$\delta_s$	Espessura da camada de fundo com mistura constante de sedimentos
$\delta_w$	Espessura da camada limite da onda
$\varepsilon$	Parâmetro interveniente no cálculo do tempo de enchimento de um esporão
$\varepsilon_{s,bed}$	Coefficiente de distribuição de mistura de sedimentos no fundo
$\varepsilon_{s,c}$	Coefficiente de distribuição da mistura de sedimentos relativo a correntes

$\varepsilon_{s,cw}$	Coefficiente de distribuição da mistura de sedimentos em profundidade, por acção simultânea de ondas e correntes
$\varepsilon_{s,max}$	Máximo coeficiente de distribuição de mistura de sedimentos
$\varepsilon_{s,w}$	Coefficiente de distribuição de mistura de sedimentos relativo a ondas
$\theta$	Ângulo formado entre raios dos modelos de configuração de linha de costa em espiral
$\theta$	Parâmetro de mobilidade efectiva das partículas, semelhante ao parâmetro crítico
$\theta_{cr}$	Parâmetro crítico de Shields (adimensional)
$\kappa$	Constante de Von Karman (0.40)
$\lambda$	Comprimento do ondulado do fundo submerso
$\mu$	Factor da forma do fundo submerso, dependente dos coeficientes de Chézy
$\mu_c$	Factor de eficiência da acção das correntes
$\mu_w$	Factor de eficiência da acção das ondas
$\xi_0$	Parâmetro de Battjes, relacionado com o tipo de rebentação das ondas
$\pi$	Número adimensional (3.14)
$\rho$	Massa volúmica da água do mar
$\rho_s$	Massa volúmica dos sedimentos
$\sigma_s$	Coefficiente de graduação da granulometria das areias
$\tau_{0s}$	Tensão tangencial efectiva no fundo
$\bar{\tau}_c$	Tensão tangencial no fundo, devida à acção das correntes
$\bar{\tau}'_c$	Tensão tangencial efectiva no fundo, devida à acção das correntes
$\tau_{cr}$	Tensão tangencial crítica no fundo
$\bar{\tau}_w$	Tensão tangencial no fundo, devida à acção das ondas
$\bar{\tau}'_w$	Tensão tangencial efectiva no fundo, devida à acção das ondas
$\bar{\tau}'_{w,c}$	Tensão tangencial efectiva total no fundo, devida à acção de ondas e correntes
$\tau_{\beta cr}$	Tensão tangencial crítica no fundo, função da inclinação do próprio fundo
$\nu$	Coefficiente de viscosidade cinemática da água do mar
$\phi$	Ângulo de atrito dos sedimentos do fundo
$\phi_{w,C}$	Ângulo entre a direcção de propagação das ondas e a direcção da velocidade de corrente
$\psi$	Ângulo entre a direcção do escoamento e a direcção da pendente da praia submersa
$\omega_s$	Velocidade de queda dos sedimentos
$\omega_{s,c}$	Velocidade de queda dos sedimentos, em função da concentração

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

Deus quer, o homem sonha, a obra nasce.  
Deus quis que a terra fosse toda uma,  
Que o mar unisse, já não separasse.

...

*Fernando Pessoa (in O Infante)*



## **1 INTRODUÇÃO**

O tema desta dissertação incide sobre os riscos de exposição de frentes urbanas em função de diferentes soluções de intervenção de defesa costeira. Na maioria dos casos, as intervenções de defesa costeira são vitais para a segurança de pessoas e do edificado. Contudo, às diferentes alternativas de intervenção de defesa podem associar-se diferentes níveis de eficácia funcional, robustez estrutural, impactos sedimentares e morfológicos na envolvente, impactos paisagísticos, dificuldades construtivas, necessidades de manutenção e custo.

Com o decorrer do trabalho foram surgindo dificuldades, problemas e questões que redireccionaram os esforços de investigação em determinados sentidos. A avaliação das vulnerabilidades e dos riscos de exposição das zonas costeiras e, em particular das frentes urbanas às acções do mar não é possível sem uma boa capacidade de previsão de cenários. Como tal, grande parte do trabalho desenvolvido refere-se à compreensão, caracterização e modelação dos complexos fenómenos físicos que ocorrem nas zonas costeiras.

A aplicação de modelos existentes e o desenvolvimento de um novo modelo, a análise de sensibilidades aos diversos parâmetros intervenientes e a cuidada observação da amplitude de resultados esperados foi efectuada com o intuito de apresentar contributos para a melhoria das capacidades de previsão, sustentando a tão desejada definição de vulnerabilidades e riscos. Avanços na capacidade de previsão e na capacidade de avaliação de vulnerabilidades e riscos possibilitarão aos órgãos de decisão as tomadas de posição com uma mais adequada base científica.

### **1.1 Enquadramento do Problema**

A interface entre as zonas terrestres e os mares ou oceanos é dinâmica. A uma escala planetária e em Portugal as observações existentes mostram evoluções acentuadas, resultando em algumas zonas uma perda significativa de território e um conflito entre ocupações ou actividades e essas evoluções. Os fenómenos de evolução de linha de costa e as erosões (ou regressões da zona terrestre) são por isso estudados neste trabalho.

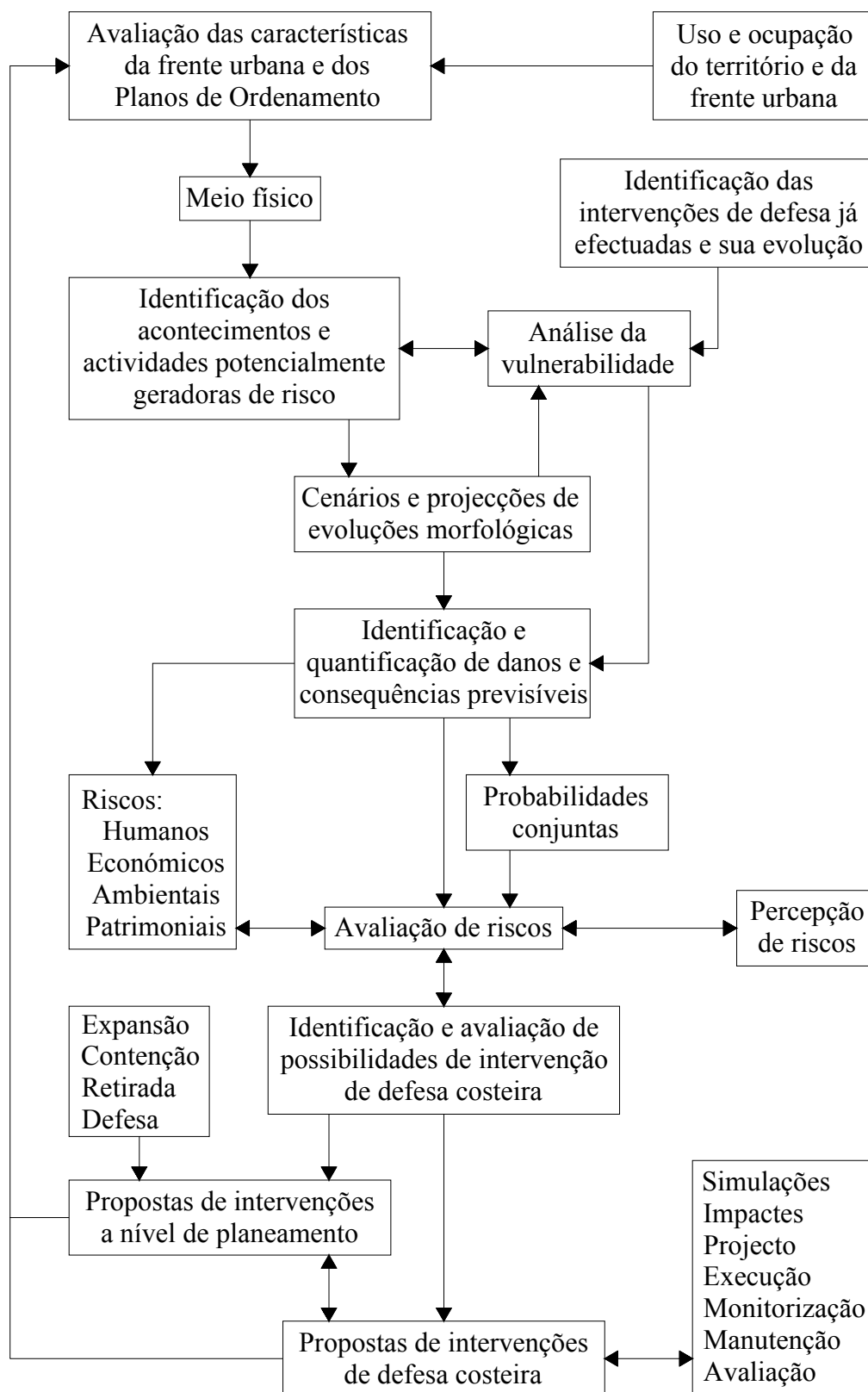


Figura 1.1: Enquadramento da avaliação de riscos de exposição de frentes urbanas.

A “linha de costa”, entendida como a intercepção do plano de água com a faixa terrestre não permanece estática ao longo do tempo (nem nunca permaneceu). A sua configuração e posição alteram-se, a escalas de tempo que variam de alguns minutos a milhões de anos, em resposta a oscilações e mudanças das acções hidromorfológicas do meio envolvente. A compreensão da tendência evolutiva futura da linha de costa também passa pela análise do comportamento no passado. É importante fazer uma caracterização histórica da evolução da orla costeira, incluindo a identificação dos acontecimentos e actividades que poderão ter algum relevo ou implicação nessa evolução, quer por acção natural, quer devido à intervenção humana. As zonas costeiras são cada vez mais procuradas pelas populações, intensificando a pressão de uso, ocupação e artificialização, agravando e dando crescente visibilidade a diversos problemas e exigindo soluções.

O organigrama da figura 1.1 representa esquematicamente o enquadramento que deve ser realizado quando se procede ao estudo de uma intervenção de defesa costeira numa frente urbana ou numa zona que se pretende proteger.

Para a caracterização numa só palavra do sentimento actual face ao problema da erosão costeira, o melhor termo será a dúvida. A dúvida é aplicada à capacidade institucional de enfrentar o problema, à eficácia do que já se fez ou do que se possa fazer e ao grau de conhecimento do fenómeno (Oliveira, 1997).

Na figura 1.2 apresenta-se resumidamente uma envolvente de dúvidas em torno do fenómeno da erosão costeira. São expostas as grandes questões que este trabalho pretende dar resposta, tendo noção que qualquer passo dado no sentido da sua resolução pode contribuir para um melhor futuro das zonas costeiras e, em particular, das zonas costeiras portuguesas.

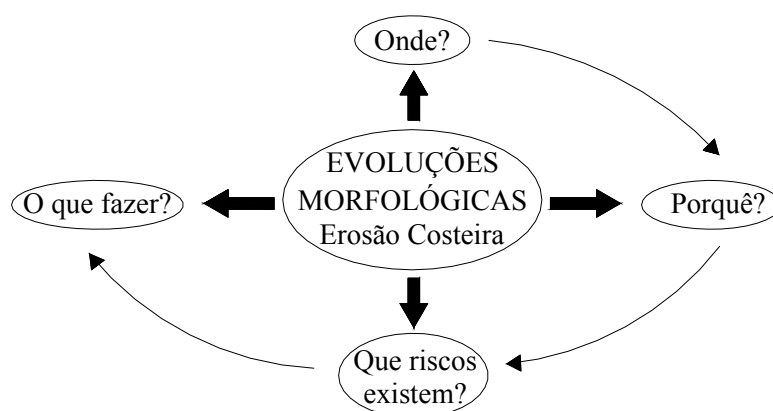


Figura 1.2: Esquema dos principais aspectos que se relacionam com as evoluções morfológicas e essencialmente, com a erosão costeira.

Para a resposta à pergunta “Onde?” será necessário essencialmente a avaliação das características das frentes urbanas e zonas edificadas, pois são estas que principalmente interessará defender. No entanto, toda a frente marítima a uma escala de unidade fisiográfica, deve ser analisada. O tipo de usos e de ocupações que possam existir na costa são condicionados e condicionam as evoluções morfológicas. As intervenções localizadas para defender algum local da costa têm normalmente consequências em regiões mais latas e por isso, toda a orla costeira deve integrar os estudos de qualquer intervenção localizada.

O “Porquê?” está relacionado com a identificação dos acontecimentos e actividades potencialmente geradoras das evoluções morfológicas e, em particular das erosões. As evoluções morfológicas resultam de um conjunto de acções dinâmicas naturais, como a agitação marítima, as marés astronómicas e as marés meteorológicas, os ventos, as correntes de origem diversa, com grande variabilidade espacial e temporal, a que se associam diferentes níveis de previsibilidade.

Quando a estes fenómenos se associam balanços sedimentares negativos, sazonais ou permanentes, frequentemente agravados ou antecipados no tempo em consequência de intervenções humanas, fala-se em erosão na área geográfica objecto da análise e para a escala de tempo considerada. Também, quando ocorrem situações extremas, podem surgir consequências nas zonas costeiras, ainda que limitadas no tempo.

De uma forma sumária e sem hierarquização, referem-se alguns aspectos, que de forma corrente são apontados como potenciais causas de erosão ou de instabilidade nas zonas costeiras, sendo também indicadas algumas das previsíveis consequências que originam:

- Os ventos geram transporte eólico, removendo e acumulando areias;
- As marés astronómicas e meteorológicas, podem originar galgamentos com inundações e o desaparecimento total ou parcial das praias;
- As tempestades (ondulação marítima), podem conduzir à redução da areia das bermas (emersas) das praias e das dunas, à movimentação de volumes de areia para sotamar, resultando daí um emagrecimento da praia e ainda originando possíveis galgamentos com inundações;
- A subida generalizada do nível médio das águas do mar, possibilitando o “avanço” das tempestades sobre terra, provocando maiores e mais frequentes galgamentos com inundações e o desaparecimento total ou parcial das praias e de outros ambientes costeiros;



- Os aproveitamentos hidroeléctricos provocam o enfraquecimento de fontes aluvionares (redução do caudal sólido transportado para o mar);
- Os quebra-mares portuários originam a interrupção do transporte sólido litoral;
- As dragagens e os canais de navegação conduzem a um défice sedimentar;
- A destruição de cordões dunares leva também ao défice sedimentar e a galgamentos com inundações;
- As extracções de areias têm consequências a nível de défice sedimentar, alterações dos campos de correntes e galgamentos com inundações;
- A urbanização através de construções nas zonas de interacção fisiográfica, nomeadamente praias e dunas, pode conduzir à destruição ou fragilização destes sistemas, com previsíveis inundações, danos ou destruição de edifícios ou da própria marginal;
- As obras de protecção costeira podem originar défices sedimentares a sotamar ou agravar as reflexões, dificultando a estabilidade dos sedimentos.

“Que riscos existem?” é a pergunta que surge de seguida. A eventual perda de território desabitado e sem qualquer valor ecológico, cultural ou patrimonial será provavelmente aceite pela generalidade das pessoas, mas mesmo essa situação representa uma perda. Quando vidas humanas, valores patrimoniais e económicos, valores ecológicos e ambientais ou valores culturais estão em jogo, as potenciais perdas aumentam. O risco poderá ser definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um acontecimento potencial (indesejado), pela consequência (indesejada) associada a esse acontecimento. Este factor é fundamental em toda a análise da dinâmica costeira e da erosão costeira, permitindo uma potencial quantificação de perdas.

A pergunta a que os gestores têm que responder será “O que fazer?”. Os órgãos de gestão a quem compete tomar as decisões precisam fundamentar as opções que fazem. Expandir, conter e adaptar, retirar ou defender são soluções que se colocam, todas elas com pontos favoráveis e pontos contra. Se as opções puderem ser baseadas em conhecimentos científicos válidos, então as decisões tornar-se-ão mais sustentadas. Este é o principal pressuposto que regeu a elaboração deste trabalho.

A interface entre o meio terrestre e o oceano é complexa e envolve muitos fenómenos físicos cuja investigação ainda não domina. A análise dos fenómenos depende de diversos parâmetros de difícil quantificação. Os estudos elaborados no âmbito desta dissertação incidem sobre zonas costeiras arenosas e sujeitas a um regime de agitação muito energético. Não incidem sobre costas com sedimentos coesivos ou costas com arribas ou falésias. Considera-se que o grau de conhecimento e

de modelação dos fenómenos costeiros é ainda limitado. A análise global dos fenómenos que ocorrem nas frentes costeiras corresponde a um problema de enorme dimensão.

Há necessidade de quantificar as consequências/custos de erosões, inundações e galgamentos, em termos de perdas de vidas, perda de território ou em termos de danos (nos equipamentos, infra-estruturas e/ou edifícios). A avaliação dos riscos exige uma discussão da aceitabilidade sócio-económica dos graus de risco e um balanço custo/benefício das intervenções de defesa ou do seu reforço. Esta avaliação terá de entrar em consideração com aspectos de ordenamento e cercar esse mesmo ordenamento (em termos de localização e expansão das zonas edificadas, aumento da densidade habitacional, etc.).

Para conhecer o meio físico, é necessário analisar as características topográficas, geológicas, geomorfológicas e de revestimento do solo das frentes costeiras. Estes valores indicam a sensibilidade da região às acções marítimas. Por outro lado, é necessário compreender as características das acções (marés, ondas e sua propagação até à costa). A tradução quantitativa destas acções, normalmente é realizada após tratamento estatístico de séries de registos existentes que convenientemente devem ser o mais longo possível. Naturalmente, algumas destas acções apresentam uma componente aleatória que dificulta a sua estimativa e projecção. A modelação do seu comportamento ainda está limitada e é essencial que evolua, pelo que o estudo de séries de registos longas representa um precioso contributo.

Em qualquer estudo relativo a intervenções nas zonas costeiras é necessário identificar a evolução da zona costeira com a análise de registos históricos e a definição de taxas de erosão ou acreção que traduzem o recuo ou avanço da linha de costa. Há que procurar os motivos ou causas que conduziram a essa evolução. Todas as possibilidades de intervenção de defesa costeira devem ser ponderadas. A projecção de cenários, com a avaliação das consequências de cada intervenção tem de ser estudada. É necessário proceder à monitorização das soluções e à avaliação dos resultados esperados em função dos locais onde foram utilizadas.

É importante quantificar as interacções entre as acções energéticas do mar e as fronteiras sólidas naturais (praias, dunas, fundos costeiros) e artificiais (obras de defesa). Associar probabilidades à sua ocorrência pode auxiliar a compreensão dos fenómenos que ocorrem na interface entre o meio terrestre e o mar. O comportamento sazonal das praias, os efeitos de temporais, o transporte sedimentar longitudinal ou a variabilidade dos perfis transversais das praias é difícil de traduzir em modelos numéricos e apenas algumas características se reproduzem em modelos físicos.

Compreender a sensibilidade aos parâmetros intervenientes e avaliar aqueles parâmetros que são mais importantes em cada fenómeno vai contribuir para o sucesso dos estudos costeiros.

A capacidade de projectar e representar a posição da linha de costa ao longo do tempo e de a relacionar com o clima de agitação ainda não é eficaz. A modelação da configuração de equilíbrio da linha de costa de uma praia pode auxiliar na definição das posições de menor vulnerabilidade de uma zona costeira. Nos últimos anos, aproveitando os cada vez mais potentes métodos computacionais, têm sido desenvolvidos novos modelos. É necessário estudar e melhorar estes modelos.

## **1.2 Objectivos do Trabalho**

Este trabalho pretende apresentar contributos:

- Sobre o estado da arte das metodologias de análise de vulnerabilidades e riscos actualmente utilizadas nos estudos de ordenamento das zonas costeiras;
- Sobre a possibilidade de elaborar uma metodologia simples de classificação de vulnerabilidades e riscos incorporando alguns factores que não têm sido considerados;
- Para a melhoria da capacidade de compreensão das acções e dos complexos fenómenos do transporte sedimentar e do comportamento morfodinâmico das zonas costeiras e das intervenções humanas que interferem com esses fenómenos;
- Na compilação de dados e registos históricos das acções e evolução costeira, da evolução de defesas efectuadas, de propostas e decisões em termos de ordenamento territorial e de possíveis cenários de evolução e de intervenções de defesa;
- Para evidenciar as potencialidades e limitações dos modelos de previsão do comportamento fisiográfico da linha de costa;
- No desenvolvimento de um método de cálculo automático apropriado às características das costas arenosas, que represente diferentes cenários, a médio e longo tempo, de evolução da linha de costa, ocupação territorial e defesa costeira e obtenha espectros de resultados possíveis. Estes resultados podem assumir uma importância fundamental na análise de vulnerabilidades e riscos associados a diferentes cenários de intervenção ou de evolução da zona costeira (morfologia e desenvolvimento das frentes urbanas ou edificadas);
- Na análise da sensibilidade do modelo desenvolvido à variabilidade e incerteza associada a diversos dos parâmetros intervenientes;

- Na aplicação do modelo a situações tão próximas quanto possível da realidade e em particular à costa da região de Aveiro.

### **1.3 Metodologia**

Neste capítulo, após o pequeno enquadramento apresentado e após a caracterização dos objectivos pretendidos, refere-se agora a sequência dos trabalhos desenvolvidos e de que forma estes se apresentam nos capítulos seguintes.

Inicia-se o trabalho com a avaliação de diversas metodologias de análise de vulnerabilidades e riscos e com diferentes propostas de classificação dos numerosos parâmetros intervenientes nos processos costeiros. Constata-se que é fundamental criar uma metodologia capaz de representar diferentes cenários e projectar “manchas” de resultados possíveis. A análise dos riscos como resultado final do trabalho só pode ser conseguida com a capacidade de previsão ou projecção do futuro, balizando a incerteza associada à dinâmica costeira.

Assim, o capítulo 2 apresenta uma sucinta abordagem a metodologias de análise de vulnerabilidades e riscos e a diferentes critérios de classificação de parâmetros, deixando para a restante exposição do trabalho a análise dos fenómenos envolvidos, de forma a tentar projecções sobre os comportamentos futuros, em face de diferentes intervenções sobre o meio costeiro. A apresentação de uma metodologia simples de classificação de vulnerabilidades e riscos para efeitos de ordenamento está fragilizada pela dificuldade de ponderação dos diversos parâmetros, com a variabilidade da importância relativa de cada um deles, ao longo do tempo e do espaço.

Como facilmente se entende, a evolução da linha de costa está relacionada com o transporte de sedimentos, que directamente condiciona a morfologia do litoral. Tal como as acções que conduzem ao transporte sedimentar, os processos de transporte são de importância relevante na caracterização da zona costeira.

A definição das acções que mobilizam os sedimentos e os transportam, traduzindo o dinamismo sempre presente na evolução da costa, revela ser muito aleatória. Com uma perspectiva global, mas com uma incidência especial na costa de Aveiro, apresentam-se no capítulo 3 as diversas acções naturais a considerar (marés, ventos, agitação marítima, etc.). Foi recolhido um volume significativo de elementos, visando criar séries de dados tão extensas quanto possível. Desta forma

pretende-se apoiar a projecção de cenários em registos passados. Foi avaliada a capacidade de modelação das acções em função de diferentes efeitos (refracção, difracção, empolamento e rebentação das ondas). Foi estudada a relação de dependência existente entre o vento e as ondas.

Ainda no capítulo 3 são expressas algumas das actividades e intervenções que o ser humano têm efectuado e que condicionam a forma de evolução das zonas costeiras. Algumas das acções reflectem-se de forma indirecta no evoluir da costa, já que o seu objectivo principal não é o de alterar as características das zonas costeiras. Outras intervenções são precisamente para tentar controlar o evoluir de situações, de acordo com os interesses dos utilizadores e das ocupações. Os resultados das intervenções podem ser diversos e por vezes mal conhecidos.

No capítulo 4, referem-se as principais propriedades físicas da água do mar e dos sedimentos. Verifica-se que devido à sua variabilidade temporal e espacial, algumas das grandezas são de difícil definição.

Ainda no capítulo 4 é efectuada a apresentação de diversos modelos que traduzem a representação dos fenómenos de transporte sedimentar. Numa primeira secção é efectuada a descrição de diversas tentativas de caracterização dos processos ao longo dos tempos e de imediato é constatada a grande dispersão de valores que se obtêm na aplicação desses modelos. Na tentativa de compreender os processos de transporte sólido, são expostos diversos conceitos associados ao transporte sedimentar longitudinal e avaliada a sensibilidade dos parâmetros intervenientes.

Numerosos conceitos relativos às características dos perfis transversais são utilizados na modelação. A dificuldade de realizar medições no campo aumenta a incerteza quanto à adopção de valores adequados a cada conceito. A comparação de diversas situações relativas à inclinação de praia, profundidade activa do perfil transversal e perfis de equilíbrio contribuem para a compreensão do estado actual do conhecimento.

A previsão da configuração da linha de costa é estudada no capítulo 5. A observação de formas costeiras que se repetem na natureza conduziu a diversas propostas de configuração em planta de linhas de costa em equilíbrio, esquecendo a influência directa dos fenómenos envolvidos, nomeadamente o transporte. O estudo dos processos físicos de transporte sedimentar e das representações da linha de costa permitiu o desenvolvimento de um método de cálculo automático apropriado às características das costas arenosas, para mais facilmente representar diferentes cenários e obter as pretendidas “manchas” de resultados possíveis.

Com o modelo de previsão da linha de costa pretende-se testar a sensibilidade de diversas questões consideradas relevantes e ainda pouco estudadas. Como exemplo, refere-se a importância das condições de transporte sedimentar nos limites das zonas costeiras em estudo, condicionantes na forma de evolução da costa. Outros aspectos importantes são a configuração topográfica das regiões em erosão ou em acumulação de sedimentos, a forma de evolução dos perfis transversais em situações de desequilíbrio sedimentar e o nível médio da água do mar na definição da largura activa, ou seja, na região onde existem alterações nas cotas dos fundos.

O capítulo 6 representa uma numerosa aplicação dos conceitos e modelos a situações concretas ou “inspiradas” na costa aveirense. A história da dinâmica litoral da região de Aveiro e das intervenções de defesa costeira efectuadas representa o primeiro passo no estudo dessa zona costeira. O balanço sedimentar, traduzido pela avaliação dos valores de transporte sedimentar e pelas taxas de variação do litoral, permite uma noção do comportamento desta região.

Com base em todas as séries de registos de dados estudadas no capítulo 3, são criados diversos cenários de agitação marítima, que poderão representar um ano típico de agitação ao largo da costa Noroeste portuguesa. Com recurso a modelos numéricos existentes, é projectada a agitação local que se poderá sentir entre a Barra e a praia de Mira.

Uma das principais propriedades que caracteriza os meios costeiros sedimentares, por ser um parâmetro interveniente em numerosos conceitos, é a dimensão média dos sedimentos. Por esse motivo, procedeu-se a campanhas de campo na região de Aveiro.

É efectuada uma análise do comportamento de diversas características dos perfis transversais. A inclinação da praia é uma característica variável no espaço e no tempo, relacionando-se com o clima de agitação marítima e com a dimensão dos sedimentos. Com base na aplicação da regra de Bruun, é efectuada a estimativa da taxa de recuo da linha de costa por subida generalizada do nível médio das águas do mar.

O capítulo 7 apresenta em síntese as principais considerações que se foram destacando ao longo do trabalho desenvolvido. São indicados possíveis desenvolvimentos que representam a continuidade desta investigação.

**Capítulo 2**  
**VULNERABILIDADES E RISCOS**  
**ASSOCIÁVEIS ÀS ACÇÕES ENERGÉTICAS DO MAR**

...

Hoje

Sei apenas gostar

Duma nesga de terra

Debruada de mar.

*Miguel Torga (in Pátria)*





## **2 VULNERABILIDADES E RISCOS ASSOCIÁVEIS ÀS ACÇÕES ENERGÉTICAS DO MAR**

A vulnerabilidade das zonas costeiras às acções energéticas do mar pode ser entendida como a sensibilidade desses sistemas biofísicos, manifestada por alterações hidromorfológicas (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997). Estas alterações, de que podem resultar inundações e perdas irreversíveis de território, ocorrem durante a actuação das ondas, marés, ventos e correntes, e podem ser intensificadas pela ocorrência de acontecimentos extremos, pelo progressivo enfraquecimento de fontes aluvionares (aproveitamentos hidroeléctricos, construção de quebra-mares, extracção de areias, dragagens e canais de navegação), pela progressão da edificabilidade (construções nas zonas de interacção fisiográfica, esporões e obras aderentes, aterros sobre praias, destruição de dunas), pela subida generalizada do nível médio das águas do mar, pelos movimentos de neotectónica e por eventuais alterações meteorológicas.

A análise das vulnerabilidades de uma zona costeira e das suas evoluções ao longo do tempo, em relação às acções energéticas do mar é essencial em termos de ordenamento. É sobre esta temática que a presente dissertação se debruça e não sobre outras análises de vulnerabilidades, também importantes nas zonas costeiras como por exemplo as vulnerabilidades em relação aos derrames e descargas poluentes associadas à navegação, à poluição difusa, às acções sísmicas (incluindo tsunamis), à exploração de recursos vivos e à exploração de recursos turísticos.

O risco pode ser definido como sendo o produto da probabilidade de ocorrência de um acontecimento potencial indesejado (temporal, erosão), pela consequência indesejada associada a esse acontecimento (mortes, ferimentos, perda de território, inundação, destruição do edificado, perda de actividades económicas, afectação de um ecossistema). As frentes urbanas e as infra-estruturas localizadas em zonas costeiras muito vulneráveis às acções energéticas do mar ficam submetidas a situações de risco que dependem da existência ou não de intervenção de defesa costeira.

Os riscos de exposição de frentes edificadas e aglomerados urbanos às acções energéticas do mar dependem não só das vulnerabilidades da orla costeira onde se localizam ou se venham a implantar, mas também das características das frentes edificadas e aglomerados (extensão, cotas, proximidade ao plano de água, volumetria, actividades, concepção da marginal, etc.).

É possível identificar orlas costeiras com um elevado índice de vulnerabilidade às acções energéticas do mar, mas sem grandes riscos de exposição por inexistência de ocupação humana ou porque essa ocupação se verifica a distâncias, ou com uma localização, ou com usos compatíveis com a ocorrência de alterações hidromorfológicas previsíveis num horizonte de projecto suficientemente longo. Este horizonte terá de ser diferente consoante esteja em causa um apoio de praia amovível, um parque de campismo, um aglomerado com edifícios de grande volumetria ou um complexo de produtos químicos perigosos (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997).

As tentativas de classificação de riscos são relativamente recentes (pouco mais de uma década), mas demonstram uma preocupação e consciencialização crescente para os problemas da erosão e da dinâmica costeira. Uma correcta classificação de vulnerabilidades e riscos para efeitos de zonamento e ordenamento do território deverá ser feita com ponderação de numerosos factores. Para tal, é necessário avaliar os processos e fenómenos envolvidos. À medida que se aprofundaram os estudos, verificou-se a elevada complexidade e incerteza associada às capacidades de previsão. Todos os trabalhos desenvolvidos nesta dissertação, posteriores a este capítulo, tiveram a intenção de aumentar a compreensão dos complexos fenómenos da evolução costeira e contribuir para melhorar a fiabilidade da previsão das evoluções. No entanto, há que reconhecer as limitações que subsistem na capacidade de previsão dos fenómenos e das suas consequências, para diferentes horizontes de projecção.

## **2.1 Métodos e Estratégias de Análise**

Face à complexidade do problema, o tratamento das questões relacionadas com a classificação das zonas costeiras quanto à vulnerabilidade e ao risco é abordado de variadas maneiras na bibliografia. A forma de recolha da informação e de tratamento dessa mesma informação não está normalizada, existindo diferentes métodos e estratégias com mais ou menos detalhe de análise.

A informação requerida para uma análise de vulnerabilidades e riscos deverá englobar o melhor conhecimento possível da topografia, batimetria, geomorfologia e geologia da área de estudo. É necessário conhecer as séries de registos de ondas e marés, tempestades e suas consequências, avaliar os problemas actuais de erosões ou inundações, as intervenções humanas ao nível de estruturas de defesa, as acções de planeamento previstas, etc.

A necessidade de recorrer a ferramentas para criar uma base de dados para análise, representa uma parte essencial no processo de classificação de vulnerabilidades e riscos. Estas ferramentas e a metodologia de análise da informação recolhida confundem-se por vezes durante a formulação das respostas a determinados problemas (Nicholls, 1998).

Referem-se de seguida sumariamente as principais características de diversas ferramentas e métodos que servem de base à classificação de vulnerabilidades. Estas metodologias têm vindo a desenvolver-se na última década com base na aplicação ao problema da subida generalizada do nível médio das águas do mar, mas poderão aplicar-se, com adaptações e restrições, às acções energéticas em geral.

A extrapolação das previsões para situações futuras, com horizontes até cerca de cem anos, obriga à compreensão e tratamento de diversos fenómenos que o conhecimento científico actual ainda não domina. A incerteza associada à capacidade de projectar o futuro também limita as estratégias de análise.

### **2.1.1 Metodologia “IPCC Commom Methodology (CM)”**

Para o problema da subida generalizada do nível médio das águas do mar, o estudo das vulnerabilidades das zonas costeiras tem vindo a ser efectuado desde a última década. De acordo com Nicholls (1998), os primeiros estudos decorreram em países desenvolvidos, particularmente ameaçados pela subida do mar, tais como os Países Baixos e os EUA. Estes países tiveram uma forte influência na primeira metodologia genérica de avaliação de vulnerabilidades, designada de “Commom Methodology (CM)” e desenvolvida no âmbito do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

A metodologia “IPCC Commom Methodology (CM)” foi proposta em 1991 e revista em 1992, com base na experiência dos primeiros estudos. Esta metodologia compreende sete passos genéricos:

- 1) Definição da área de estudo;
- 2) Inventário das características da área;
- 3) Identificação dos factores de desenvolvimento sócio-económicos relevantes;
- 4) Avaliação das alterações físicas;

- 5) Formulação das estratégias de resposta;
- 6) Avaliação do perfil de vulnerabilidades;
- 7) Identificação das necessidades futuras.

Essencialmente, esta metodologia apresenta uma sequência lógica de questões claras e genéricas e como tal, ajudou a criar em muitas nações a preocupação pelas alterações climáticas e a focalizar a atenção nas questões costeiras a longo termo (Nicholls, 1998).

### 2.1.2 “Aerial Videotape-Assisted Vulnerability Analysis (AVVA)”

Este é um método que foi considerado como rápido e de baixo custo, para fazer face à frequente falta de dados nos estudos das zonas costeiras. É semi-quantitativo e qualitativo, pelo que a experiência e capacidade de análise das equipas que o utilizam é fundamental, sendo este o aspecto que mais limita a sua utilização e validade generalizada (Andrade e Freitas, 2002). Como o próprio nome indica, o método consiste na análise das vulnerabilidades com base numa observação aérea das regiões costeiras. Eventualmente, os registos aéreos podem ser melhorados ou validados com a utilização de mapas topográficos e geológicos.

Tabela 2.1: Classificação pela técnica AVVA, dos atributos naturais (Andrade e Freitas, 2002).

Atributo	Características
Geomorfologia costeira	Praias
	Lagunas e ambientes húmidos
	Arribas
	Frentes defendidas artificialmente
Geomorfologia terrestre	Zonas planas
	Vertentes inclinadas
	Terrenos montanhosos
	Zonas lagunares
Tendência de evolução	Erosão confirmada
	Tendência de erosão
	Acreção, estável ou estabilizada

Andrade e Freitas (2002) organizaram dados recolhidos pela técnica AVVA, classificando-os em atributos naturais (tabela 2.1) e atributos sócio-económicos (tabela 2.2). Os atributos naturais de classificação referem-se à geomorfologia costeira, à geomorfologia da zona terrestre adjacente e às tendências de evolução.

Podem também identificar-se atributos sócio-económicos. A classificação destes atributos deve referir-se às estruturas de protecção e defesa, ao uso do solo na frente costeira, à densidade populacional e ao nível de desenvolvimento costeiro.

Tabela 2.2: Classificação pela técnica AVVA, dos atributos sócio-económicos (Andrade e Freitas, 2002).

Atributo	Características
Estruturas de protecção (se existirem)	Obras longitudinais aderentes
	Muros
	Esporões
	Quebramares
	Portos protegidos
Uso de solo	Urbano/citadino
	Residencial
	Industrial
	Turístico
	Agrícola
	Florestal
	Vegetação rasteira
Densidade populacional	Árido
Densidade populacional	Alta > 10 hab/km <sup>2</sup>
	Baixa < 10 hab/km <sup>2</sup>
Desenvolvimento costeiro	Alto
	Baixo

### 2.1.3 Técnica SMART

A técnica SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique) é uma forma prática de aceder ao cálculo dos riscos. Esta técnica foi descrita de forma detalhada por Goodwin e Wright (1991) e segundo Andrade e Freitas (2002), provou ser aplicável a diversas situações de classificação de vulnerabilidades e riscos associados a problemas costeiros. Consiste na divisão do domínio de estudo, em pequenas células preferencialmente da mesma dimensão, procedendo-se ao tratamento e análise de cada uma em separado. Devem-se estabelecer listas de atributos relevantes para o problema. Assim, cada célula é passível de ser caracterizada por um valor (qualitativo ou quantitativo, podendo este último ser discreto ou contínuo). Durante esta fase do processo deve ser efectuada uma análise cuidada e que evite redundâncias (Andrade e Freitas, 2002).

A eliminação de valores extremos ou que desequilibrem a classificação de cada atributo é o passo seguinte do processo e pode ser efectuado por uma análise de normalização estatística, com a aproximação de curvas de distribuição normal, se o número de diferentes células em análise for suficiente e assim o permitir (Andrade e Freitas, 2002).

A agregação dos resultados de cada célula, por adição ou multiplicação, permite a combinação de uma multiplicidade de atributos e assim, uma aproximação de primeira ordem à classificação de vulnerabilidades e riscos. A tradução e representação dos resultados, por via de gráficos ou mapas seriam fáceis de executar (Andrade e Freitas, 2002).

A aplicação desta técnica, efectuada por Andrade e Freitas (2002), à costa portuguesa, para riscos de subida do nível do mar corresponde à reorganização dos dados recolhidos pela técnica AVVA, agrupando-os em quatro atributos relevantes para as vulnerabilidades costeiras utilizando uma aproximação do tipo SMART.

Tabela 2.3: Índices de classificação da vulnerabilidade da costa à perda de território. O índice aumenta com o aumento das vulnerabilidades da costa (adaptado de Andrade e Freitas, 2002).

Atributo	Características	Índice
Obras de defesa	Sem protecção	4
	Quebramares, esporões	3
	Obras aderentes	2
	Portos protegidos	1
Tendência de evolução	Erosão confirmada	3
	Tendência de erosão	2
	Acreção, estável ou estabilizada	1

O valor da ocupação do solo resulta da multiplicação dos índices de densidade populacional e de desenvolvimento costeiro, de acordo com a tabela 2.4 (Andrade e Freitas, 2002).

Tabela 2.4: Índices de classificação do valor da ocupação do solo (adaptado de Andrade e Freitas, 2002).

Atributo		Índice
Densidade populacional	Alta > 10 hab/km <sup>2</sup>	2
	Baixa < 10 hab/km <sup>2</sup>	1
Desenvolvimento costeiro	Alto	2
	Baixo	1

Depois de agregar a distribuição do risco de perda de território devido à subida do nível do mar com o valor da ocupação da costa, é feita uma abordagem do tipo SMART. O risco foi classificado em 5 classes, definidas pelos intervalos indicados na tabela 2.5, correspondentes a uma normalização estatística. A informação é relativa à área em análise (costa continental portuguesa) e tem como base a média nacional.

Tabela 2.5: Índices de classificação de riscos (Andrade e Freitas, 2002).

Classe	Definição dos intervalos	Valores standard	Índice
Muito baixo	$x_i \leq x_{\text{médio}} - 1.6\sigma$	$] -\infty ; -4.05 ]$	1
Baixo	$x_{\text{médio}} - 1.6\sigma < x_i$	$] -4.05 ; -1.28 ]$	2
	$x_{\text{médio}} - 0.5\sigma \geq x_i$		
Médio	$x_{\text{médio}} - 0.5\sigma < x_i$	$] -1.28 ; 1.26 ]$	3
	$x_{\text{médio}} + 0.5\sigma \geq x_i$		
Alto	$x_{\text{médio}} + 0.5\sigma < x_i$	$] 1.26 ; 4.04 ]$	4
	$x_{\text{médio}} + 1.6\sigma \geq x_i$		
Muito alto	$x_i \geq x_{\text{médio}} + 1.6\sigma$	$] 4.04 ; \infty ]$	5

#### 2.1.4 Método de Nicholl's

Avaliando os impactos das alterações climáticas nas características das zonas litorais, a preocupação mais pertinente é a quantificação e distribuição de perda de território que pode acontecer devido à subida previsível do nível do mar e da mudança no clima de agitação marítima e das situações de tempestade, que potencialmente conduzem a inundações ou erosões. Os galgamentos e inundações são aqui definidos como o aumento de submersão permanente de áreas litorais situadas a cotas baixas, enquanto a erosão representa a remoção física de sedimentos por ondas e correntes. O primeiro mecanismo de perda em qualquer local depende da geologia e geomorfologia da costa, da sua morfodinâmica e dinâmica sedimentar e das condições limites no momento inicial do estudo (Andrade e Freitas, 2002).

Ao contrário da técnica SMART, este método não inclui múltiplas variáveis. Após a avaliação geomorfológica, passa à análise do impacto em termos de perdas de território. Os mecanismos de perda de território podem ser classificados em galgamentos e inundações, e em erosões. O conceito de riscos é tido no seu sentido mais restrito, já que não há uma avaliação da resposta costeira, nem é estabelecida uma correlação com o valor do território (Andrade e Freitas, 2002).



Tabela 2.6: Caracterização de impactes em função da geomorfologia da costa.

Características da costa	Mecanismos de perda do território
Costa rochosa	Não há perdas
Arribas sedimentares e costa arenosa	Erosão
Costa a baixa altitude	Galgamentos e inundações

A classificação utilizada é apresentada na tabela 2.6, representando eventuais perdas de território em função das características geomorfológicas da região costeira. Esta tabela em conjunto com a aplicação da metodologia AVVA, descrita na secção 2.1.2 permite uma abordagem muito simples (e simplista) de avaliação de vulnerabilidades.

### 2.1.5 Metodologia “U.S. Country Studies Program”

Esta metodologia, desenvolvida por Leatherman e Yohe (1996), é apresentada por Nicholls (1998), para a situação particular do problema da subida do nível do mar e respectivas consequências nas Caraíbas. No entanto, esta metodologia poderia ser ajustada a outras acções energéticas. Assim, o método “U.S. Country Studies Program” compreende quatro passos:

- 1) Crivagem preliminar;
- 2) AVVA;
- 3) Análise económica;
- 4) Análise de adaptação.

O AVVA é utilizado para a caracterização da costa e a estimativa de perdas de território. A análise de adaptação consiste na avaliação de custos de quatro cenários de protecção às acções marítimas, dependendo do uso da costa. A decisão sobre qual o cenário mais adequado baseia-se na análise económica do ponto anterior. É feito um balanço entre as perdas nos dias de hoje e os custos de protecção até ao ano 2100, definindo três classes de áreas costeiras: protecção, retirada ou incerteza (Nicholls, 1998). É pois necessário ter capacidade de previsão, num horizonte de cem anos dos acontecimentos e da evolução da zona costeira bem como do dimensionamento, eficácia e custos das intervenções de protecção.

### **2.1.6 Análises de Simm e Cruickshank (1998)**

Esta análise está mais relacionada com os riscos na construção de obras de engenharia costeira, os quais derivam na grande maioria, da variabilidade e incerteza das acções (ondas, correntes, marés, etc.), da necessidade de trabalhar e colocar material na água (...) e na dificuldade em adoptar procedimentos apropriados a estas circunstâncias especiais (Simm e Cruickshank, 1998).

Tradicionalmente, a gestão de riscos é aplicada “instintivamente”, com os riscos a existirem implicitamente e a serem avaliados pela experiência. A gestão de riscos deve explicitar esses riscos, descrevendo-os e tornando-os mais fáceis de gerir. A identificação dos riscos permite a seu escalonamento por prioridades, conduzindo à concentração de esforços no seu controlo e ao balanço entre os custos e benefícios das medidas de controlo (Simm e Cruickshank, 1998).

Segundo Simm e Cruickshank (1998), na generalidade, a gestão de riscos relaciona-se com incertezas, tomadas de decisão e acções com base no conhecimento ou incerteza do que pode acontecer. Por causa da incerteza, uma boa decisão pode não conduzir a um bom resultado, mas a gestão de riscos deve aumentar o sucesso dos resultados.

As fontes de risco são diversas, sendo algumas bem conhecidas (estatisticamente), outras mal quantificadas e outras mal identificadas. As consequências são também de vários tipos, podendo algumas ser quantificadas em termos de, por exemplo, segurança, tempo ou custos, e outras de dimensão ambiental, social ou política. A gestão de riscos e as medidas de mitigação devem demonstrar “valer a pena” intervir. As ferramentas de gestão de risco devem, por si só, permitir a análise de custos e benefícios da gestão de riscos.

A identificação do tipo de consequências é fundamental para a definição de objectivos. As consequências podem ser económicas, em número de dias (atraso na conclusão dos trabalhos), em qualidade ambiental ou em segurança. A mitigação dos riscos tem custos e impactes que também interessa avaliar. A estimativa do benefício real das medidas de mitigação permitem avaliar a validade das próprias medidas.

Simm e Cruickshank (1998) apresentam diversas tabelas extraídas de um guia elaborado pela CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) para controlo de riscos e gestão sistemática dos riscos na construção. Procedendo a uma adaptação das características da

construção de obras de engenharia costeira para os problemas de erosão, com galgamentos e inundações, podem elaborar-se as tabelas 2.7 a 2.11.

Tabela 2.7: Escala típica de probabilidades de ocorrência (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).

Ocorrência	Descrição	Escala	Probabilidade
Frequente	Provável ocorrência muitas vezes durante o período $T$	4	$100/T$
Provável	Ocorrências diversas durante o período $T$	3	$10/T$
Ocasional	Algumas ocorrências durante o período $T$	2	$1/T$
Remota	Improvável, mas possível ocorrência durante o período $T$	1	$1/10T$
Improvável	Muito improvável ou não possível ocorrência em $T$	0	$1/100T$

$T$  – período de tempo em análise.

O período de tempo em análise é variável em função do problema em estudo. Este período deve ser definido de maneira a que as probabilidades de ocorrência mais frequentes se aproximem dos 100%.

Tabela 2.8: Escala típica de consequências (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).

Consequência	Descrição	Escala	Custo
Catastrófica	Mortes, perdas de terreno	4	$100V$
Crítica	Feridos, prejuízos avultados	3	$10V$
Séria	Feridos ligeiros, prejuízos registados	2	$1V$
Marginal	Pessoas atingidas sem gravidade, reabilitações ligeiras	1	$V/10$
Desprezável	Sem consequências	0	$V/100$

$V$  – valor médio das consequências.

Por vezes, as consequências dos problemas de erosão, galgamentos e inundações podem não ser directamente associadas a um valor económico (por exemplo, mortos e feridos). Assim, na análise dos custos deve ser avaliado um valor médio, numa ponderação de difícil quantificação.

Tabela 2.9: Importância dos riscos (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).

Ocorrência	Escala	Consequência				
		Catastrófica	Crítica	Séria	Marginal	Desprezável
		4	3	2	1	0
Frequente	4	16	12	8	4	0
Provável	3	12	9	6	3	0
Ocasional	2	8	6	4	2	0
Remota	1	4	3	2	1	0
Improvável	0	0	0	0	0	0

Tabela 2.10: Custo dos riscos por unidade de tempo (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).

Probabilidade		Consequência				
		Catastrófica	Crítica	Séria	Marginal	Desprezável
		100V	10V	1V	V/10	V/100
Frequente	100/T	10000V/T	1000V/T	100V/T	10V/T	V/T
Provável	10/T	1000V/T	100V/T	10V/T	V/T	V/10T
Ocasional	1/T	100V/T	10V/T	V/T	V/10T	V/100T
Remota	1/10T	10V/T	V/T	V/10T	V/100T	V/1000T
Improvável	1/100T	V/T	V/10T	V/100T	V/1000T	V/10000T

Tabela 2.11: Aceitabilidade dos riscos (adaptada de Simm e Cruickshank, 1998).

Probabilidade	Consequência				
	Catastrófica	Crítica	Séria	Marginal	Desprezável
Frequente	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejável	Indesejável
Provável	Inaceitável	Inaceitável	Indesejável	Indesejável	Aceitável
Ocasional	Inaceitável	Indesejável	Indesejável	Aceitável	Aceitável
Remota	Indesejável	Indesejável	Aceitável	Aceitável	Desprezável
Improvável	Indesejável	Aceitável	Aceitável	Desprezável	Desprezável

Quando a classificação é de “inaceitável”, o risco tem que ser mitigado ou transferido. A classificação de “indesejável” deve também ser mitigada se possível, requerendo investigação detalhada, monitorização, avaliação de custos e conhecimento da situação ao mais alto nível. Quando “aceitável”, o risco deve ser convenientemente gerido e no caso de ser “desprezável” não serão necessárias mais considerações (Simm e Cruickshank, 1998).

É necessário cuidado na combinação das probabilidades e consequências de cada factor gerador de riscos, pois podendo ter o mesmo impacte, geralmente os riscos com elevadas consequências e menores probabilidades de ocorrência são mais importantes de gerir do que os de altas probabilidades, mas baixas consequências (Simm e Cruickshank, 1998).

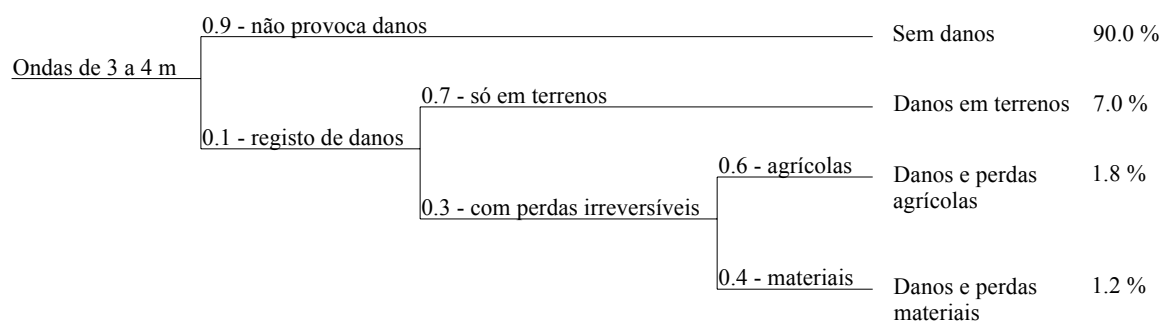


Figura 2.1: Exemplo de definição de probabilidades por ramificação de eventos (adaptado de Simm e Cruickshank, 1998).

Simm e Cruickshank (1998) propõem ainda uma abordagem por definição de probabilidades por ramificação de eventos (figura 2.1). Este método permite a introdução de quantidades no processo de tomada de decisão. A representação em forma de diagrama do conjunto de alternativas ilustra a sequência das tomadas de decisão e dos respectivos resultados esperados em cada circunstância.

### 2.1.7 Metodologia Veloso-Gomes

Veloso-Gomes e Papadatos (1995) propuseram uma metodologia, com suporte em sistemas de informação geográfica, para a quantificação das vulnerabilidades das orlas costeiras às acções energéticas do mar (erosões, galgamentos) e para a graduação dos riscos a que ficam expostos os aglomerados populacionais a essas acções. Nesta proposta, a vulnerabilidade é entendida como a sensibilidade da zona costeira às acções, manifestada através de alterações hidromorfológicas potenciais, ou que estejam documentadas. Os riscos de exposição das frentes edificadas e dos

aglomerados urbanos dependem das vulnerabilidades, mas também das características dessas frentes, como extensão, proximidade ao plano de água, volumetria, etc. (Veloso-Gomes, 1996).

A metodologia para a análise das vulnerabilidades que Veloso-Gomes e Papadatos (1995) propõem, incorpora numerosos factores ambientais e antrópicos a considerar para o estudo de uma orla costeira. Referem-se a topografia da orla costeira, a constituição geológica e geomorfológica com informação orientada para uma análise da sua potencial variabilidade temporal, as cotas da água associadas ao regime de marés astronómicas e às marés meteorológicas, a quantificação do clima de agitação local a partir do clima de agitação ao largo, as cotas de espraio da agitação e as cotas de espraio de acontecimentos extremos, a intensidade e rumos de correntes locais (correntes de deriva litoral), o potencial de transporte da corrente de deriva litoral, a constituição e revestimento dos solos da faixa terrestre adjacente, a localização relativa a fontes de alimentação aluvionar (à escala da unidade fisiográfica), a quantificação dessas fontes e sua evolução histórica (rios e estuários, zonas em erosão contributivas como praias e dunas, fundos marinhos), a localização relativa a retenções naturais ou artificiais, as extracções de sedimentos em praias, dunas e em canais de navegação, o historial das evoluções fisiográficas, o balanço sedimentar entre erosões e acreções referidos a diversos intervalos de registo, os acontecimentos singulares, os cenários de evolução futura, as artificializações introduzidas (obras de defesa), com as suas características sumárias e sequência construtiva, as alterações fisiográficas induzidas e as evoluções anteriores e posteriores a essas artificializações.

Uma orla costeira será tanto mais vulnerável às acções energéticas do mar quanto mais elevadas forem essas acções energéticas, menores as “defesas” naturais, menores as suas altitudes, mais elevado for o défice entre a capacidade potencial de transporte sólido e a alimentação de sedimentos (de uma forma geral, actualmente ocorrem reduções acentuadas nesta alimentação).

Veloso-Gomes e Taveira-Pinto (1997) afirmam que a metodologia para a análise de riscos, através da sua graduação, deverá incorporar as características da ocupação urbana existente na unidade fisiográfica e os cenários alternativos para a eventual expansão ou densificação da frente marítima urbana. As tentativas de minimização desses riscos passam pela análise crítica desses cenários considerando a eventual realização ou reforço de obras de defesa e de intervenções no sentido da redução de acções antrópicas específicas (transposição do transporte aluvionar aos quebramares, alimentação artificial das praias e zonas submersas próximas com areias resultantes das dragagens).

A aplicação da metodologia proposta, recorrendo a técnicas de SIG (Sistemas de Informação Geográfica), possibilitará a elaboração de cartas de riscos com uma melhor fundamentação científica.

Ainda segundo Veloso-Gomes e Taveira-Pinto (1997), os níveis de riscos que uma sociedade aceita ou tolera dependem da consciência para a sua existência, da natureza e intensidade das consequências (perdas de vidas, perdas de bens, inactividade), da maior ou menor dificuldade de controlo da situação geradora de riscos (tufão e tsunamis versus tempestade), da possibilidade de pré-alertas, dos antecedentes históricos, das alternativas à localização (espaços disponíveis, refugiados, proximidade ao local de actividade, por exemplo, no caso dos pescadores), do nível de desenvolvimento sócio-económico das populações. Existem situações gravíssimas de falta de segurança em orlas marítimas de diversos países em vias de desenvolvimento.

Os riscos básicos em relação à estabilidade de uma edificação são controlados por legislação e normalização nacional. As acções exteriores consideradas incluem os ventos, os sismos, mas não acções directas ou indirectas da agitação nem dos tsunamis. Os projectistas de edifícios localizados em zonas ribeirinhas críticas nem “ousam” considerar nos cálculos de estabilidade estas últimas acções apesar de, no País, já se terem verificado acções do mar sobre habitações. Veloso-Gomes e Taveira-Pinto (1997) referem que a segurança em relação a estas acções é remetida para as obras de defesa (se existentes) ou ignorada numa visão estática da situação (horizonte temporal curto). Mas as obras de defesa existentes, particularmente quando não executadas com qualidade (muitas vezes são executadas em condições adversas, sem fundação adequada) ou quando não beneficiam do enchimento com areias da sua envolvente, são bastante vulneráveis a acontecimentos extremos, a acontecimentos persistentes e à inexistência de operações relativamente frequentes de recarga, manutenção e reparação.

A metodologia proposta para uma análise de vulnerabilidades exige profundos e morosos estudos científicos, apoiados em caracterizações hidro-morfológicas exaustivas. No último decénio, os levantamentos topo-hidrográficos nas zonas costeiras portuguesas apenas foram realizados nas zonas portuárias e na envolvente próxima de algumas estruturas de defesa costeira. Sem estes e outros levantamentos as “previsões” da evolução temporal e espacial das acções erosivas ficam prejudicadas.

Há também insuficiências de conhecimento científico que se reflectem na capacidade de previsão da probabilidade de ocorrência de acontecimentos extremos e na previsão das erosões e das suas consequências.

### **2.1.8 “Carta de Risco do Litoral” (CRL, 1998)**

No final de 1998, no âmbito do projecto “Carta de Risco do Litoral”, e de acordo com um protocolo de cooperação técnica entre o Instituto da Água e o CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas do Instituto Superior Técnico, foi apresentada a segunda fase do trabalho correspondente às Cartas de Risco Digitais para dez trechos da costa portuguesa, perfazendo todo o litoral continental português (CRL, 1998).

A “Carta de Risco do Litoral” propõe uma delimitação dos territórios que podem ser considerados como “ameaçados” pelo mar. Consideraram-se “zonas de risco” os “territórios costeiros que tecnicamente possam ser considerados ameaçados pelo mar” por se estarem a verificar ou por se prever que se venham a verificar erosões que conduzam à perda irreversível do território costeiro e acções directas da agitação marítima que se traduzam em inundações da faixa litoral (CRL, 1998).

Na “Carta de Risco” foram considerados dez trechos de características homogéneas do ponto de vista geomorfológico e aluvionar (células sedimentares). Apesar da divisão dos trechos não ter correspondência, o seu traçado apoiou-se principalmente nos Estudos de Base elaborados no âmbito dos Planos de Ordenamento da Orla Costeira (POOC).

A legislação portuguesa, nomeadamente o Decreto-Lei n.º 468/71, refere a delimitação de territórios costeiros que possam tecnicamente ser considerados ameaçados pelo mar. Segundo os autores da “Carta de Risco”, o conceito de ameaça está intimamente associado ao conceito de vulnerabilidade porque só se consideram ameaçados os trechos costeiros que são vulneráveis às acções do mar e nesta conformidade, a “Carta de Risco” deveria ser entendida como uma verdadeira carta de vulnerabilidade costeira às acções do mar, dado que o seu traçado não é condicionado pelo uso que se faz dos territórios costeiros, nomeadamente pela ocupação humana e pela existência de edificações.

Para o zonamento da “Carta de Risco” são consideradas a vulnerabilidade da costa à erosão e à inundação. O conceito de erosão adoptado na “Carta de Risco” associa-se ao recuo continuado da



linha de costa (no passado recente e/ou há probabilidade de ocorrer num futuro próximo) por acção do mar, com perda de territórios costeiros de forma permanente e irreversível, pelo que excluem as variações sazonais que se verificam nos perfis de praia. A vulnerabilidade à inundação associa-se à destruição e danos nos bens que se situam na zona inundada por galgamentos de água do mar (CRL, 1998).

A análise e interpretação com vista ao zonamento apresentado na “Carta de Risco” foram feitas essencialmente com base em elementos geomorfológicos, geológicos, altimétricos, orientação da linha de costa, existência de protecções naturais, clima de agitação, história do local, tendências evolutivas e conhecimento do local.

O zonamento efectuado considera três classes de risco (vulnerabilidade): baixo, médio e alto (ou elevado). Abrange uma faixa entre a parte emersa da praia e uma linha convencional do lado de terra e poderá ser revisto em actualizações futuras face a evoluções entretanto registadas e ao conhecimento entretanto adquirido. Em alguns dos segmentos costeiros indicam-se projecções de novas posições da linha de costa.

Foram classificados como de risco (vulnerabilidade) baixo os trechos costeiros em arriba alcantilada que se tem mostrado estáveis, ou de evolução muito lenta no tempo, e em que as litologias presentes revelam não haver razão para acreditar que esta tendência possa ser significativamente alterada no futuro. São ainda incluídos nesta classe alguns trechos de costa arenosa baixa que se têm mostrado estáveis (CRL, 1998).

Na classe de risco (vulnerabilidade) médio incluíram-se todos os locais que se desenvolvem em arriba alcantilada onde foram detectadas desmoronamentos e escorregamentos ou se prevêem evoluções ou problemas de instabilidade (CRL, 1998).

Foram classificados como de risco (vulnerabilidade) elevado os segmentos costeiros que pela sua morfologia, constituição geológica, orientação e clima de agitação estão sujeitos a evoluções muito rápidas, que se traduzem no recuo da linha de costa e na perda de território costeiro (CRL, 1998).

Na elaboração da “Carta de Risco” é admitido que a Administração está disposta a manter ou a construir obras de defesa costeira (esporões, defesas frontais, quebra-mares para fixação de embocaduras e outro tipo de estruturas existentes na costa ou previstas nos POOC). Além das três

classes de risco (vulnerabilidade), há ainda uma classificação de zonas sob observação (CRL, 1998).

A compatibilidade de usos será diferenciada para as zonas classificadas como de risco baixo, médio e elevado ou deixadas sob observação. Qualquer expansão ou densificação de áreas urbanas em zonas de riscos torna mais difícil e onera opções que tenham que ser tomadas no futuro face à ameaça e ao avanço do mar. Há muitas parcelas dos territórios costeiros que previsivelmente só serão perdidas em horizontes temporais ainda distantes, o que permite que se faça uso temporário desses territórios para fins que não sejam o da expansão e desenvolvimento urbano. Incluem-se nesta categoria os espaços agrícolas e florestais, os espaços naturais, os espaços de lazer e cultura, os espaços para conservação da Natureza e as edificações ligeiras que possam ser removidas facilmente e que não obriguem a grandes obras de infraestruturação (CRL, 1998).

## **2.2 Questões Chave na Avaliação de Vulnerabilidades e Riscos**

O ordenamento das orlas costeiras é função dos valores humanos, económicos, ecológicos e culturais de cada zona específica. Compreender e prever tendências de evolução do litoral, principalmente em zonas sujeitas à ocupação humana e que poderão vir a ser afectadas, auxiliar os órgãos de decisão e planear eventuais intervenções constitui um desafio nas sociedades modernas. Os custos de defesa nas regiões costeiras de todo o mundo têm vindo a aumentar e é necessário avaliar e perceber os fenómenos envolvidos, de forma a avaliar essas intervenções em horizontes mais alargados.

O estudo de vulnerabilidades requer uma grande quantidade de informação e uma abordagem multi-disciplinar, que deve abranger as áreas da engenharia e ambiente, a área socio-económica e a área política (Nicholls, 1998).

O primeiro passo fundamental para a comunidade procurar reduzir o potencial de prejuízos é determinar e cartografar os riscos (WCU, 2003). Uma carta de riscos poderá facilitar o alcançar de objectivos como a redução de perdas de vidas humanas, dos estragos em estruturas e edifícios costeiros, a preservação de ambientes naturais, o aumento das capacidades de evacuação, a localização de novas estruturas e edifícios fora das zonas de perigo e a realocação de estruturas e edifícios existentes.

Uma carta de vulnerabilidades tenta qualificar e quantificar a “sensibilidade” das orlas costeiras às acções energéticas do mar. Uma carta de riscos deverá resultar de uma análise de riscos associados (produto da probabilidades de ocorrência de acções do mar e da quantificação das consequências dessas acções no território, ecossistemas, pessoas e bens).

Um correcto planeamento das zonas costeiras requer a compreensão dos processos costeiros, na perspectiva de delimitar as áreas mais susceptíveis e evitar potenciais perigos. A erosão, os galgamentos e as inundações durante tempestades são perigos presentes e visíveis para todos, mas a dinâmica costeira com toda a sua complexidade não é compreendida por todos.

A generalidade dos parâmetros de vulnerabilidades e riscos que se apresentam de seguida, que pretendem representar diversos factores ambientais e antrópicos, foi alvo de estudo detalhado ao longo do trabalho que se desenvolve nos capítulos seguintes. A descrição sumária de alguns dos aspectos que devem ser avaliados numa análise de vulnerabilidades e riscos tem por isso o intuito de projectar a fundamentação teórica e científica que se entende necessária nestes estudos.

### **2.2.1 Parâmetros de Vulnerabilidade**

O processo de análise conjunta de todos os parâmetros de vulnerabilidades é complexo. Numa primeira aproximação, apresentada nesta secção do trabalho, optou-se por dividir em critérios e manipular cada um deles, após a classificação de cinco classes, sendo o valor de 1 associado a menores vulnerabilidades e o valor de 5 atribuído a maiores vulnerabilidades.

Numa segunda aproximação, tentou-se a incorporação desses parâmetros num programa de modelação hidromorfológica que possibilite projecções de evolução da costa para diferentes horizontes de projecto, contemplando diversos cenários de acções naturais e antropogénicas.

#### **2.2.1.1 Topografia**

A topografia é uma das principais características a ter em conta na avaliação de vulnerabilidades de uma zona costeira. Com base nesta característica, pode-se definir a geometria da área de estudo, questão aparentemente simples, mas que apresenta sempre dificuldades. Nicholls (1998) propõe

como definição prática o limite obtido pelo nível do mar máximo num período de retorno de 1000 anos, adicionado à subida do nível do mar esperada.

Outro exemplo é o trabalho de Simeone *et al.* (2003), em que é feita uma análise de riscos às tempestades do mar, aplicada à costa do Norte de Itália (litoral de Ravenna, no mar Adriático). Considera sete variáveis distintas, onde engloba a altura da praia emersa. No entanto, nesse trabalho não é feita uma projecção das vulnerabilidades relacionadas com as cotas correspondentes ao evoluir da linha de costa para o interior da zona terrestre, nem mesmo é apresentada uma divisão consoante as classes de altitudes.

Por outro lado, em Gornitz *et al.* (1997), é adoptada uma classificação de altitudes dividida em cinco categorias, de acordo com a seguinte tabela e que poderia ser aplicada à realidade da costa portuguesa.

Tabela 2.12: Classificação da vulnerabilidade quanto a cotas topográficas.

Vulnerabilidade	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
	1	2	3	4	5
Cota topográfica referida ao ZH (m)	> 30	> 20	> 10	> 5	≤ 5
		≤ 30	≤ 20	≤ 10	

Cada uma das divisões será passível de corresponder, respectivamente, à classificação de inundações frequentes, inundações prováveis, galgamentos ocasionais, galgamentos remotos e finalmente galgamentos muito improváveis, consoante a vulnerabilidade vai reduzindo. Este tipo de informação permite cartografar um mapa topográfico com os cinco níveis de vulnerabilidade.

### 2.2.1.2 Distância à linha de costa

A consideração da distância à linha de costa de uma zona edificada ou de uma infra-estrutura é de fundamental importância. Este aspecto não é considerado na generalidade dos estudos efectuados, pois a maioria desses estudos adopta uma abordagem linear e simplista em relação à orla costeira, admitindo um valor único do índice de vulnerabilidade para todo o interior terrestre que corresponde a uma dada frente marítima, desprezando qualquer variação de características (topográficas, geológicas) na direcção do interior.

Como é evidente, um local situado a certa distância da linha de costa, mas que esteja numa zona arenosa de cotas baixas e sem protecção apresenta alguma vulnerabilidade, enquanto um local bem próximo da costa, mas com uma cota elevada e em zona rochosa ou protegida pode não ser vulnerável. A mancha de vulnerabilidades vai-se atenuando para o interior, à medida que a distância à fronteira marítima vai aumentando.

A probabilidade de um ponto da zona costeira ser atingido pela água do mar, estando a uma determinada distância da linha de costa, definida como a linha a que corresponde o nível médio das águas do mar, está necessariamente dependente de uma questão temporal relacionada com a escala de aplicação, pois a linha de costa vai evoluir ao longo do tempo. Assim, em função do horizonte temporal da análise, pode ser proposta uma classificação de acordo com a tabela 2.13, a que corresponde uma baixa probabilidade de ocorrência de problemas para zonas com distâncias à linha de costa superiores a um quilómetro. Nestas situações, os modelos de configuração de linha de costa serão um auxiliar precioso na avaliação de distâncias que ofereçam alguns riscos de vir a ser atingidas.

Tabela 2.13: Classificação da vulnerabilidade quanto a distância à linha de costa.

Vulnerabilidade	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
	1	2	3	4	5
Distância à linha de costa (m)	> 1000	> 200 ≤ 1000	> 50 ≤ 200	> 20 ≤ 50	≤ 20

A inclinação do terreno até à distância em análise será importante, mas ficará representada pela característica topográfica já considerada. Este ponto de avaliação também pode ser conjugado com as taxas de erosão e acreção, descritas na secção 2.2.1.8.

### 2.2.1.3 Geologia

Adoptando e adaptando a tabela apresentada por Gornitz *et al.* (1997), as cartas geológicas permitem avaliar a natureza de rochas e sedimentos, e criar uma classificação baseada no comportamento e escala de dureza dos minerais que as compõem.

Assim, as rochas magmáticas ou eruptivas, englobando neste grupo as rochas plutónicas, resultantes da cristalização lenta do magma (granito ou gabro) e as rochas vulcânicas, como o basalto ou o riolito, são rochas de elevada dureza e por isso a sua vulnerabilidade a qualquer acção do mar é baixa (Rebelo, 1999). Estas rochas são classificadas com o índice de vulnerabilidade 1.

A generalidade das rochas metamórficas resulta da transformação (cristalização), em profundidade, de rochas pré-existentes (sedimentares ou eruptivas sob os efeitos da temperatura e/ou pressão diferentes daquelas em que se originaram). No entanto, as rochas metamórficas podem também resultar de alterações térmicas ligadas à implantação de maciços magmáticos intrusivos (Rebelo, 1999). São exemplo de rochas metamórficas os xistos, gneisses, quartzitos e mármore, sendo a sua vulnerabilidade classificada com o índice 2.

As rochas sedimentares são resultantes do transporte e acumulação de detritos provenientes, quer da destruição (erosão) de rochas preexistentes, quer de partículas derivadas das partes mineralizadas de organismos (conchas, esqueletos, espículas, etc.), ou ainda da precipitação química de sais (Rebelo, 1999). Os calcários, os conglomerados, os arenitos ou grés e os argilitos, são exemplos de rochas sedimentares e quanto à vulnerabilidade, são classificadas com o índice 3.

Os sedimentos não consolidados de grande dimensão, como a gravilha ou cascalho e a litologia variada ou misturada são classificados com o índice de vulnerabilidade 4. Todos os sedimentos não consolidados de pequenas dimensões, tais como as areias, as argilas e os siltes são classificados com o índice de máxima vulnerabilidade, ou seja, o valor 5.

Na tabela seguinte, baseada em Gornitz *et al.* (1997), resume-se o que agora foi exposto.

Tabela 2.14: Classificação da vulnerabilidade quanto a características geológicas.

Descrição	Vulnerabilidade
Rochas magmáticas (granito, gabro, basalto, etc.)	1
Rochas metamórficas (xisto, gneisse, mármore, etc.)	2
Rochas sedimentares (calcário, arenito, argilito, etc.)	3
Sedimentos não consolidados de grandes dimensões, litologia variada	4
Sedimentos não consolidados de pequenas dimensões (areias, argilas e siltes)	5

O estudo do mapa geológico das zonas de estudo permite efectuar o zonamento destas cinco classes de vulnerabilidades.

#### 2.2.1.4 Geomorfologia

Andrade e Freitas (2002), no estudo de vulnerabilidades da costa à perda de território devido às alterações climáticas, em especial à subida do nível do mar, atribuem índices de classificação em função da geomorfologia. A tabela seguinte resulta já de uma adaptação desse trabalho, incorporando alguma da classificação efectuada por Gornitz *et al.* (1997).

Tabela 2.15: Classificação da vulnerabilidade quanto a características geomorfológicas.

Descrição	Vulnerabilidade
Montanhas	1
Arribas rochosas	2
Arribas erodíveis, praias abrigadas	3
Praias expostas, planícies	4
Dunas, restingas, estuários, aluviões, lagoas	5

Em Portugal, só em 1981 foi publicado o primeiro mapa geomorfológico, na escala 1:500 000, em que se integrava também a respectiva Notícia Explicativa. Neste mapa existem 54 símbolos gráficos correspondentes a formas de relevo, divididas em quatro categorias, designadamente, formas estruturais, formas fluviais, formas e formações de vertentes interflúvias e por fim, formas litorais e submarinas (Rebelo, 1993).

#### 2.2.1.5 Revestimento do solo

Não é um parâmetro utilizado nas classificações de vulnerabilidade mais frequentes. No entanto, são previsíveis diferentes comportamentos morfológicos de uma orla costeira em função do tipo de revestimento do solo: vegetação (solo cultivado, vegetação rasteira, florestas), materiais em pavimentos (permeáveis, impermeáveis), solos sem vegetação e não revestidos. Por exemplo, o aumento da impermeabilização de zonas costeiras reduz a alimentação dos níveis freáticos

alterando o seu interface com os níveis de água do mar e aumenta e concentra o escoamento superficial. Esta alteração pode favorecer as erosões por ravinamentos das falésias.

Quanto maior for o nível de alteração do estado natural de revestimento de um solo, maior poderá ser a sua vulnerabilidade. No seu estado natural e permeável, um solo mais revestido poderá ser menos vulnerável (a vegetação das dunas confere uma defesa natural às próprias dunas, ao contrário de dunas sem vegetação e consequentemente sem capacidade de retenção natural das areias). A tabela 2.16 apresenta uma proposta discutível baseada nestes dois aspectos.

Tabela 2.16: Classificação da vulnerabilidade quanto a revestimento do solo.

Descrição	Vulnerabilidade
Floresta	1
Vegetação rasteira, solo cultivado e jardins	2
Solo não revestido	3
Urbanizado rural	4
Urbanizado ou industrial	5

Apesar da sua importância, considera-se que este é um factor com menor peso nas vulnerabilidades, do que outros dos parâmetros apresentados. Assim se realça a necessidade de ponderação destes aspectos de forma criteriosa.

#### 2.2.1.6 Amplitudes de maré

Gornitz *et al.* (1997) apresentam um critério de divisão de vulnerabilidades em função das amplitudes de maré registadas na costa. A tabela seguinte resume esse critério.

Tabela 2.17: Classificação da vulnerabilidade quanto a amplitudes de maré.

Vulnerabilidade	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
	1	2	3	4	5
Amplitude de marés (m)	< 1.0	$\geq 1.0$ < 2.0	$\geq 2.0$ $\leq 4.0$	> 4.0 $\leq 6.0$	> 6.0



Thieler e Hammar-Klose (1999) apresentam um critério que está em contradição com o apresentado na tabela 2.17, classificando as altas vulnerabilidades quando as amplitudes de maré são inferiores a 1 m e as baixas vulnerabilidades para amplitudes de maré superiores a 6 m. Gornitz *et al.* (1997) referem que a classificação de altas vulnerabilidades para as zonas com grandes amplitudes de maré advém do facto de a estas amplitudes se associarem também correntes mais elevadas, com impacte no comportamento costeiro. No entanto, Thieler e Hammar-Klose (1999) invertem essa classificação baseados na potencial influência das tempestades na evolução da costa e no impacte destas em função da amplitude de maré. Referem que quando não existem grandes amplitudes de maré, as tempestades ocorrerão sempre próximas do nível máximo, aumentando os seus efeitos. Esta perspectiva serve para realçar o grau de incertezas e até contradições com que ainda se está a trabalhar neste campo.

### 2.2.1.7 Alturas de onda significativa

A gama de alturas de ondas significativas que incidem sobre uma região costeira serve como indicador da energia das ondas e relaciona-se directamente com o potencial de transporte de sedimentos. Os valores de alturas de onda são extremamente variáveis de região para região e no tempo. A tabela apresentada em Gornitz *et al.* (1997) poderá ser aplicada à gama de registos na costa portuguesa.

Tabela 2.18: Classificação da vulnerabilidade quanto a alturas de onda significativa.

Vulnerabilidade	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
	1	2	3	4	5
Máxima altura		$\geq 3.0$	$\geq 5.0$	$\geq 6.0$	
de onda significativa (m)	$< 3.0$	$< 5.0$	$< 6.0$	$< 6.9$	$\geq 6.9$

No entanto, como forma de realçar a variabilidade no tratamento desta característica, a tabela apresentada por Thieler e Hammar-Klose (1999) referente à costa Atlântica dos Estados Unidos, não tem o mesmo critério, adoptando intervalos de alturas de onda de poucas dezenas de centímetros, sendo a classe de maiores vulnerabilidades a partir de ondas superiores a 1.25 m.

### 2.2.1.8 Análise temporal das taxas de erosão e acreção

A utilização das taxas de movimentação da linha de costa é uma das medidas mais utilizadas por cientistas e engenheiros, aparecendo nas figuras de planeamento para indicar a dinâmica e os perigos na costa (Dolan *et al.*, 1991).

Na maior parte dos casos, a taxa de erosão/acreção pretende “resumir” o acumular do processo de dinâmica da costa ao longo do tempo. A precisão desse “resumo” depende da precisão nas medições da linha de costa, da variação temporal da linha de costa, do número de pontos com medições usadas no cálculo da taxa, da proximidade temporal entre as medições, da variação temporal das tendências de evolução, da data de início de aquisição de dados e do método utilizado no cálculo da taxa. Se a variação da costa está a seguir uma tendência uniforme, as variações temporais na aquisição de dados não são importantes e a precisão final na determinação da taxa pode ser alta, mas na realidade, poucas são as linhas de costa com esse comportamento. O primeiro passo para a determinação das taxas de erosão ou acreção é o da demarcação e medição da posição da linha de costa, existindo numerosos processos, baseados em fotografias aéreas, mapas, cartas náuticas e perfis transversais. A determinação da taxa baseada em várias medições também pode obedecer a diversos métodos (Dolan *et al.*, 1991).

As alterações da posição da linha de costa em costas arenosas e em períodos de tempo curtos são em geral cíclicas e podem estar associadas a evoluções dos perfis transversais. As projecções de taxas de erosão/acreção para longo termo com base em períodos curtos, podem por isso resultar em avaliações erróneas. Segundo Elliot e Clark (1989), são necessários no mínimo dez anos para definir uma tendência a longo termo, como referem Dolan *et al.* (1991). Mas este período de dez anos poderá não ser suficientemente extenso para cobrir acontecimentos extremos que, por si só, tenham um elevado impacte irreversível na fisiografia costeira.

As tendências passadas em termos de evolução de linha de costa, as taxas de erosão/acreção registadas no passado, relacionadas com eventuais intervenções, são um auxiliar precioso para as tentativas de projecção do comportamento futuro. É fundamental verificar se existe alguma variação significativa dessas taxas, em consequência de alguma intervenção efectuada.

Gornitz *et al.* (1997) propõem uma divisão de vulnerabilidades em função das taxas de erosão e acreção. A classificação mais baixa de vulnerabilidades é atribuída para taxas de acreção superiores a dois metros por ano e a classificação mais alta corresponde a taxas de erosão superiores a dois

metros por ano. As classificações intermédias são definidas por intervalos de apenas um metro em cada classe de taxa de erosão ou acreção anual. Este mesmo critério é utilizado por Thieler e Hammar-Klose (1999), num estudo de vulnerabilidades da costa Atlântica dos Estados Unidos à subida do nível das águas do mar.

Andrade e Freitas (2002) dividem este critério em apenas 3 classes, designadamente as praias que estão estabilizadas, em acreção ou protegidas por trabalhos de artificialização, as que apresentam tendências de erosão e as que apresentam erosões confirmadas. Assim, perante as propostas expostas, sugere-se uma nova classificação, eventualmente mais adequada à costa portuguesa e correspondente à apresentada na tabela 2.19.

Tabela 2.19: Classificação da vulnerabilidade quanto a taxas de erosão ou acreção.

Vulnerabilidade	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito alta
	1	2	3	4	5
Taxas de erosão/acreção (m/ano)	> 0	> -1	> -3	> -5	≤ -5
	acreção	≤ 0	≤ -1	≤ -3	erosão

### 2.2.1.9 Acções antropogénicas

As intervenções humanas com impacte nos volumes de sedimentos em circulação na costa litoral, tais como os aproveitamentos hidroeléctricos, as dragagens, os quebra-mares e esporões, as extracções de areias, a urbanização em zonas dinâmicas e a destruição de cordões dunares, potenciam os valores de erosão da costa, aumentando as suas vulnerabilidades. Há necessidade de mitigar estas consequências (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997).

A classificação deste tipo de vulnerabilidades deve ser função da probabilidade do potencial de transporte de sedimentos (função das características de agitação) ser superior ao volume de sedimentos disponível, por efeito de redução das fontes sedimentares (devido a extracção de areias, dragagens, aproveitamentos hidroeléctricos, quebra-mares e esporões).

A quantificação da probabilidade de erosão também é função do grau de intervenções de defesa já efectuadas no local e da sua eficácia, sendo menores as probabilidades em zonas onde existam

defesas, como esporões, obras aderentes, alimentação artificial, dunas artificiais e paliçadas para retenção de areias.

Assim, as probabilidades de erosão devido a intervenções humanas com influência no comportamento natural da dinâmica costeira devem incluir não só o efeito negativo de intervenções muitas vezes com relação indirecta na região costeira, mas também a acção de defesa de intervenções realizadas.

Tabela 2.20: Classificação da vulnerabilidade quanto a acções antropogénicas.

Descrição	Vulnerabilidade
Intervenções com estruturas de manutenção da posição da linha de costa	1
Intervenções sem estruturas, mas sem evidência de redução nas fontes sedimentares	2
Intervenções sem estruturas, mas com evidência de redução nas fontes sedimentares	3
Sem intervenções e sem evidência de redução nas fontes sedimentares	4
Sem intervenções e com evidência de redução nas fontes sedimentares	5

Nas intervenções de defesa classificadas como “de manutenção da posição da linha de costa” incluem-se as obras paralelas e perpendiculares à costa, tais como quebra-mares destacados, obras longitudinais aderentes, esporões e campos de esporões, bem como os quebra-mares portuários. As intervenções sem estruturas são as alimentações artificiais de areias, as dunas artificiais e as paliçadas para retenção de areias. Note-se que a classificação da existência de um tipo de defesa pressupõe que ela se mantenha efectiva durante o período horizonte de análise, ou seja, obrigando a operações de monitorização e manutenção periódicas. Caso essa situação não esteja assegurada, a classificação de vulnerabilidades neste aspecto deve ser reanalisada.

Desde que exista algum motivo para que as fontes sedimentares sejam inferiores à capacidade potencial de transporte longitudinal, e que por isso seja evidente ou previsível um défice no balanço sedimentar, deve ser considerada a redução da fonte sedimentar. Assim, na constatação da existência de extracções de areias, dragagens, aproveitamentos hidroeléctricos com impacto nas fontes aluvionares a barlar do local em análise e de quebra-mares ou esporões também a barlar do local em análise, a classificação de vulnerabilidades expressa na tabela 2.20 será superior. Na existência de estabilidade da frente costeira no seu estado natural e quando não existirem intervenções, nem evidência de redução de sedimentos, pode ser considerado um índice de vulnerabilidade inferior a quatro, quando convenientemente avaliado.

### 2.2.2 Parâmetros de Risco

A avaliação de riscos tem uma importância crescente na sociedade contemporânea. O conceito de riscos aplica-se a eventos com efeitos negativos que podem ocorrer no futuro e interessa que essa possibilidade de ocorrência possa ser quantificada ou avaliada, de forma a superar situações problemáticas e a hierarquizar decisões. Em termos técnico-científicos, a medida de incerteza ou a caracterização do nível de incerteza face a cada potencial acontecimento identificado é realizada pelo conceito de probabilidade. A vantagem deste tipo de caracterização, admitindo que é possível obter o valor da probabilidade, é a de se poder comparar níveis de incerteza e de permitir a adopção de um sistema racional e lógico de decisão (Almeida, 2003).

Apesar de teoricamente possível, por razões morais e éticas, não é aconselhável que as perdas humanas e materiais tenham um tratamento equivalente. A percepção dos riscos é muito importante para os serviços de protecção civil e autoridades de segurança nos processos de decisão e acção.

A grandeza risco assim definida é variável no tempo, quer pela alteração das probabilidades de ocorrência das acções geradoras dos riscos, quer pela alteração das vulnerabilidades da zona costeira, por exemplo com intervenções de defesa, quer pela alteração das consequências, por exemplo, por alteração do uso do solo (Almeida, 2003).

A obtenção de um critério para a classificação dos riscos não é simples, nem pode ser objectiva. Baseia-se em diferentes metodologias de análise estatística, de experiência de opções e decisões tomadas por responsáveis políticos, trabalhos de campo, inquéritos, etc. A analogia e comparação com diferentes situações é muito importante. A operacionalidade do conceito da gestão dos riscos não constitui uma criação forçada. A substância dos riscos já existia e não se altera só pelo facto de se discutir e de aplicar o conceito. O facto da sociedade ser agora um actor nos processos de decisão, a visibilidade das situações, consequências e responsabilidades dos danos ser acrescida, obriga a melhorar os níveis de segurança e a reduzir os níveis de vulnerabilidade (Almeida, 2003).

O risco representa a consequência indesejada do fenómeno de erosão costeira. O risco definido desta forma, deve permitir a representação em mapas, das curvas de igual risco. A criação de classes de risco em função dos valores obtidos conduzirá a classificação de diferentes áreas, servindo de ferramenta auxiliar no planeamento da orla costeira e nas tomadas de decisão de futuras intervenções. Como acontece na generalidade dos assuntos abordados neste trabalho, a utilização de factores de calibração pode ser necessária, para que cada parâmetro de risco exprima

de uma forma mais realista o peso que realmente representa. A análise da magnitude, dos efeitos e da importância dos diferentes impactos a curto e a longo prazo e a interação entre os riscos, avaliando o seu efeito cumulativo, é necessária.

#### **2.2.2.1 Riscos humanos**

A probabilidade de vidas humanas serem afectadas pelas condições nas zonas costeiras deve ser reduzida.

Em termos de análise concreta, a quantificação deste risco deve ser função da densidade populacional das áreas em estudo. Áreas de maior densidade populacional têm um maior risco. A sazonalidade também é importante na avaliação deste aspecto, mas pode ser conjugada com os parâmetros de avaliação das actividades económicas.

A dimensão da área de estudo é decisiva na obtenção de uma densidade populacional. Andrade e Freitas (2002) referem um parâmetro sócio-económico de avaliação, onde classifica a densidade populacional em alta ou baixa, consoante esta seja superior ou inferior a 10 habitantes por quilómetro quadrado. A proposta apresentada na tabela 2.21 apresenta cinco classes, permitindo classificar o risco desde muito baixo até muito elevado, consoante a densidade populacional da área de estudo.

Tabela 2.21: Classificação do parâmetro de risco humano.

Descrição	Risco
Não povoado	Muito baixo
Densidade populacional menor do que 10 hab/km <sup>2</sup>	Baixo
Densidade populacional entre 10 e 50 hab/km <sup>2</sup>	Médio
Densidade populacional entre 50 e 100 hab/km <sup>2</sup>	Elevado
Densidade populacional maior do que 100 hab/km <sup>2</sup>	Muito elevado

### 2.2.2.2 Riscos económicos

As populações aspiram e têm direito ao usufruto das condições climáticas e paisagísticas das zonas costeiras. As actividades de recreio, lazer e turismo estão numa fase de crescimento acentuado. O turismo representa uma componente muito importante, ou mesmo vital, para muitas economias a níveis nacional, regional ou local. Há, inúmeras comunidades nas zonas costeiras muito dependentes do turismo, tanto a nível de mercado de emprego como do comércio (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997). A pesca é outra actividade económica altamente dependente das condições das zonas costeiras. Inúmeras infra-estruturas de apoio à pesca localizam-se em zonas susceptíveis de ser atingidas pelas águas do mar. As infra-estruturas portuárias localizadas nas zonas costeiras procuram criar e gerir estruturas de defesa (quebramares) que propiciem abrigo e segurança em relação à agitação e correntes.

Assim, o valor do território, será função do uso do solo, sendo menos significativo o território desocupado, do que o solo agrícola, do que as frentes habitadas ou densamente habitadas e turísticas. O número de postos de trabalho em causa e relacionados com estas actividades é respectivamente crescente.

Ao risco económico está também associado o valor dos bens. O volume de bens imobiliários em risco é importante na avaliação do risco. Um parque de campismo, uma zona residencial, ou uma zona industrial têm necessariamente que ser avaliados de forma distinta, em termos económicos.

Tabela 2.22: Classificação do parâmetro de risco económico.

Descrição	Risco
Não edificado e sem actividades económicas	Muito baixo
Baixa densidade de construção e pouca actividade económica associada	Baixo
Densidade de construção média e pouca actividade económica associada	Médio
Actividade económica e elevada densidade de construção	Elevado
Elevada actividade económica e elevada densidade de construção	Muito elevado

Por falta de dados ou elementos estatísticos, a tabela 2.22 não traduz directamente o número de empregos em causa, deixando também em aberto questões de expansão que actualmente se verificam em zonas ainda pouco exploradas. Assim, a sua aplicação deve ser cuidadosa e criteriosa.

### 2.2.2.3 Riscos ambientais

O património ecológico deve ser mantido. As alterações permanentes das características das zonas costeiras podem conduzir a condições impróprias para determinados ecossistemas. Essas situações devem ser avaliadas e representam naturalmente um maior risco do que uma zona onde não existam espécies ameaçadas.

Tabela 2.23: Classificação do parâmetro de risco ambiental.

Descrição	Risco
Não existem ecossistemas importantes ameaçados	Muito baixo
Não existem espécies animais e vegetais ameaçadas	Baixo
Espécies ameaçadas	Médio
Espécies típicas da fauna e flora local, ameaçadas	Elevado
Ecossistemas importantes ameaçados	Muito elevado

Na percepção comum, o risco ambiental não representa a mesma importância que o risco de perda de vidas humanas. No entanto, ponderando as necessárias equivalências, quando algum ser vivo de determinada espécie é ameaçado, deve conduzir a uma crescente importância na avaliação de riscos.

### 2.2.2.4 Riscos patrimoniais

Tal como o património ecológico, o património cultural também deve ser mantido. Edificações que representam a história e cultura de uma região (faróis, fortificações, etc.) têm também um valor a preservar, independentemente do valor económico e do número de pessoas que possam estar em risco.



Tabela 2.24: Classificação do parâmetro de risco de património.

Descrição	Risco
Não existe património a preservar	Muito baixo
Existem algumas edificações não classificadas	Baixo
Edificações típicas de um local	Médio
Existem algumas edificações históricas	Elevado
Edificações históricas	Muito elevado

### 2.2.3 Classificação de Vulnerabilidades e Riscos

Pretendia-se que a classificação apresentada para a generalidade dos parâmetros de vulnerabilidades e riscos fosse de aplicação simples e objectiva. No entanto, a utilização de uma grelha de valores do tipo da exposta nas tabelas seguintes (tabela 2.25 e tabela 2.26), que permita a compilação da avaliação num resultado concreto e de fácil leitura, necessita de extremo cuidado de análise, pois pode facilmente conduzir a conclusões erróneas.

Tabela 2.25: Classificação e ponderação dos parâmetros de vulnerabilidade, para identificação da vulnerabilidade global.

Parâmetro de vulnerabilidade	Classificação (1 a 5)	Coeficiente de ponderação
Topografia		
Distância à linha de costa		
Geologia		
Geomorfologia		
Revestimento do solo		
Amplitudes de maré		
Alturas de onda significativa		
Taxas de erosão e acreção		
Acções antropogénicas		
Média ponderada = Vulnerabilidade global		

A importância dos diversos parâmetros envolvidos no estudo tem que ser ponderada. O peso que cada parâmetro deve tomar na classificação final é diferente em cada situação, variando em termos espaciais e temporais. A ponderação pode ser decisivamente condicionante no resultado.

A dificuldade de obtenção de alguns dos dados que permitam caracterizar os nove parâmetros de vulnerabilidades apresentados, está associada principalmente à dificuldade de os conjugar de uma forma apropriada. A avaliação dos coeficientes de ponderação pode ser questionada, para qualquer local em análise.

Tabela 2.26: Matriz de classificação de riscos associados às acções energéticas do mar.

		Parâmetro de risco condicionante					Legenda:
		Muito baixo	Baixo	Médio	Elevado	Muito elevado	
Vulnerabilidade global	1	I	I	I	II	III	I – Risco desprezável;
	2	I	I	II	III	IV	II – Risco baixo;
	3	I	II	III	IV	V	III – Risco médio;
	4	II	III	IV	V	V	IV – Risco elevado;
	5	III	IV	V	V	V	V – Risco muito elevado.

Na matriz apresentada na tabela 2.26, considera-se que a classificação do parâmetro de risco condicionante determina a análise de risco global. Assim, sem contrariar o exposto anteriormente, pode ser adoptado como parâmetro de risco condicionante o valor médio dos parâmetros de risco avaliados, com a ponderação admitida adequada. Sugere-se que o parâmetro de risco condicionante a adoptar nunca deve ser mais baixo que o considerado para o parâmetro de risco humano. Esta forma de classificação simplifica a avaliação, mas conduz a necessários cuidados de interpretação dos resultados.

Uma análise de vulnerabilidades e riscos apresentada desta forma tem como grande atractivo o aspecto intuitivo da classificação. No entanto, a apresentação de resultados tem que ser exposta em função do horizonte em análise (10 anos, 50 anos, 100 anos, etc.) obrigando a projectar comportamentos e intervenções futuras. A previsão do futuro implica o conhecimento e compreensão dos fenómenos físicos, sociais e económicos envolvidos, conhecimento e compreensão que à data actual são ainda limitados.

Toda a secção 2.2 deste trabalho pretende apresentar um contributo na identificação de questões chave na avaliação de vulnerabilidades e riscos às acções energéticas do mar. No entanto, no prosseguimento do estudo e como apoio ao processo decisório, optou-se por investir na melhoria da capacidade de compreensão e previsão da evolução dos comportamentos fisiográficos, possibilitando diferentes cenários de projecção.

#### **2.2.4 Estratégias de Controlo de Riscos**

Para finalizar este tema, referem-se sumariamente algumas das possíveis atitudes perante os riscos, que se relacionam directamente com as tomadas de decisão e de intervenção. Estas atitudes baseiam-se em possíveis estratégias para controlo dos riscos apresentadas por Simm e Cruickshank (1998) para a construção de obras de engenharia costeira e poderiam ser adoptadas em função da classificação obtida por aplicação da matriz da tabela 2.26.

##### **1) Eliminar o risco**

Uma classificação de risco V sugere que o risco deve ser eliminado. O custo desta opção pode ser impraticável e a eliminação de um risco pode introduzir outros. Na prática, por incapacidade técnica ou inviabilidade económica é por vezes impossível extinguir um problema. Na generalidade das soluções, o que existe é uma transferência do risco para outros locais, o que deve ser convenientemente avaliado. Esta avaliação deve ser sustentada com a modelação de cenários e a projecção de desenvolvimentos futuros.

##### **2) Redução do risco**

Essencialmente, quando o risco é elevado ou muito elevado, deve haver a preocupação de reduzir o risco. A redução de um risco pode ser conseguida por redução das probabilidades de ocorrência ou por limitação das suas consequências, mas também pode aumentar outros riscos. Novamente, a atitude perante o risco obriga à projecção do futuro para que se previnam as consequências das intervenções.

##### **3) Transferência do risco**

Ainda na situação de riscos elevados ou muito elevados, pode ser decidida a transferência do risco. Esta opção não elimina os possíveis problemas, continuando a ser necessário lidar com o risco noutra local e provavelmente não elimina todos os riscos do local inicial. No futuro, esse risco pode

voltar a existir. A projecção dos comportamentos costeiros na vizinhança de intervenções deve ser avaliada.

4) Partilhar o risco

Quando o risco é de menor dimensão (médio ou baixo), pode optar-se pela divisão do risco por mais do que uma entidade.

5) Segurar o risco

A questão do seguro será a compensação de prejuízos se ocorrerem perdas, por pagamento de um prémio. Para uma solução deste tipo é necessário que os riscos não sejam elevados.

6) Aceitação do risco

O aceitar o risco pode ser de uma forma passiva ou activa. A aceitação passiva acontece quando não existe a percepção da exposição ao risco e como tal, não são tomadas nenhuma medidas de controlo. Por exemplo, o risco não foi identificado, o impacte não foi previsto correctamente ou ainda não tinham sido tomadas medidas de controlo. Quando há uma aceitação activa do risco, assumem-se todas as consequências que podem advir da ocorrência. Esta aceitação só deverá ocorrer no caso do risco ser diminuto, ou seja, para classificações de risco I ou II.

### Capítulo 3

## ACÇÕES NATURAIS E ANTROPOGÉNICAS CONDICIONANTES NA EVOLUÇÃO FISIAGRÁFICA DAS FAIXAS COSTEIRAS

Tinha o tamanho da praia  
O corpo era de areia.  
E ele próprio era o início  
Do mar que continuava.

...

*Natália Correia (in Retrato Talvez Saudoso da Menina Insular)*



### **3 ACÇÕES NATURAIS E ANTROPOGÉNICAS CONDICIONANTES NA EVOLUÇÃO FISIOGRÁFICA DAS FAIXAS COSTEIRAS**

As zonas costeiras compõem uma região de interacção entre a água do mar e a terra. A interligação entre estes elementos é dinâmica, em consequência das acções originadas por ondas, marés, ventos e correntes. Também a acção humana é importante nesta relação. Neste capítulo caracterizam-se alguns dos aspectos fundamentais no desenrolar do trabalho, introduzindo os principais conceitos aplicados em processos e modelos de comportamentos costeiros.

Apesar deste trabalho pretender ter um alcance geral, são apresentados exemplos da situação na costa ocidental portuguesa, já que a mesma evidencia uma elevada exposição a acções naturais com grande variabilidade e tem sido afectada por diversas acções antropogénicas.

#### **3.1 Acções Naturais**

Nesta secção apresentam-se as acções naturais que condicionam a fisiografia das zonas costeiras. O nível da água do mar, dependente do regime de marés e da subida generalizada do nível das águas, os ventos e a agitação marítima são os agentes físicos que se vão referir. Além da caracterização dos fenómenos, apresentam-se séries de registos relativos à costa Oeste de Portugal. A variabilidade temporal destes valores é muito importante nos estudos de simulação que se apresentam posteriormente.

##### **3.1.1 Marés**

O fluxo e o refluxo das águas do mar junto à costa e consequente variação do nível da água do mar são o resultado da variação da distância relativa entre os astros (essencialmente Terra, Lua e Sol) e de acções meteorológicas. A análise desses efeitos é efectuada nos pontos seguintes deste trabalho.

### 3.1.1.1 Marés astronómicas

As forças exercidas pela Lua e pelo Sol atraem a água dos oceanos (e também dos continentes) provocando o fenómeno das marés. Mas, apesar da imensa massa do Sol, 27 milhões de vezes maior que a da Lua, o facto desta se encontrar mais próxima da Terra faz com que a influência da Lua seja mais do dobro da do Sol (ANC, 2003).

São as variações das posições do Sol e da Lua que comandam o ciclo das marés. De cada vez que a Lua passa pelo meridiano de um lugar o efeito da maré, a preia-mar, só se faz sentir um pouco mais tarde devido ao atrito das massas (água e fundo) e à necessidade de vencer a inércia. Sempre que a Lua nasce ou se põe, relativamente a esse mesmo lugar, dá-se uma baixa-mar. As grandes marés, ou marés vivas, são aquelas cuja amplitude é a maior do ciclo lunar e correspondem ao momento de concordância das atracções solares e lunares, na lua cheia e na lua nova. O Sol e a Lua encontram-se em quadratura quando as forças atractivas se encontram desfasadas em  $90^\circ$ . É durante este período, quarto minguante e quarto crescente, que as marés atingem a amplitude mínima chamando-se assim de marés mortas (ANC, 2003).

Se a Terra fosse uma esfera perfeita, sem grandes continentes, todas as zonas do planeta iam ter duas marés-altas e baixas iguais em cada dia lunar, mas os grandes continentes impedem a propagação das marés enquanto a Terra roda, estabelecendo-se assim marés complexas em cada oceano ou parte deste.

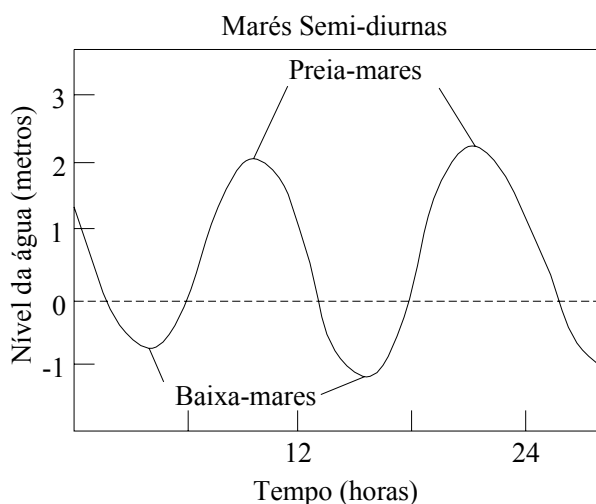


Figura 3.1: Caracterização de uma maré semi-diurna típica.



Três tipos de marés podem ocorrer nas regiões costeiras (marés diurnas, semi-diurnas ou um misto de marés semi-diurnas). Se no mesmo dia ocorrem duas marés-altas e duas marés-baixas de valores aproximadamente iguais, então a maré é designada de semi-diurna (figura 3.1).

Outras forças intervenientes, como a de outros astros, as forças de fricção entre as massas de água e o fundo, e a força de Coriolis (criada pela rotação da Terra) combinam-se para criar um sistema de ondas estacionárias e progressivas que oscilam ou rodam à volta de pontos nodais. Devido ao limite imposto pelos continentes, estes sistemas estão confinados numa bacia oceânica própria. A amplitude, nesses pontos, pode variar de 0 m a 15 m ou mais, mas de uma maneira geral essa amplitude está compreendida entre 0.9 m a 3 m. Os oceanos Atlântico e Índico têm marés semi-diurnas (duas vezes por dia), mas reagem muito fracamente à componente da maré diurna (uma vez por dia). Na Europa as marés são essencialmente semi-diurnas (ANC, 2003).



a) Baixa-mar (24-04-2004, 10:42)



b) Preia-mar (24-04-2004, 17:07)

Figura 3.2: Efeito da maré com imersão da praia, em frente à escola primária de Cortegaça, Ovar.

As marés exercem um importante controlo na ecologia e na morfologia das praias, configurando os seus perfis e as faixas emersas e imersas (figura 3.2), afectando a faixa de rebentação, o tipo de rebentação, o espraçamento das ondas e o movimento dos sedimentos.

Alguns dos conceitos mais representativos relacionados com o fenómeno das marés astronómicas estão representados na figura 3.3.

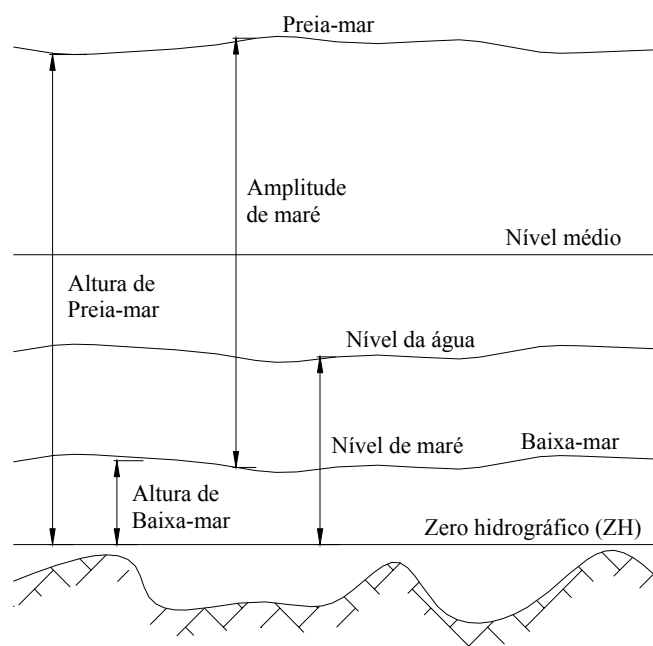


Figura 3.3: Representação de conceitos relativos a marés (adaptado de ANC, 2003).

Altura da maré ou nível de maré é, num dado momento, a altura do nível das águas acima do zero hidrográfico. O zero hidrográfico é o plano de referência para a contagem das sondas indicadas nas cartas. É um nível convencional de referência igual ou inferior ao nível da mais baixa-mar conhecida. É normalmente indicado como ZH. Amplitude da maré é a diferença entre as alturas da preia-mar e baixa-mar ou desta com a próxima preia-mar. Amplitude máxima é aquela que ocorre por ocasião das marés vivas equinociais, amplitude média ocorre por ocasião das marés vivas médias e amplitude mínima é aquela correspondente à menor elevação das águas. Baixa-mar é o nível das águas no fim da vazante quando estas se conservam estacionárias. Em marés semi-diurnas, quando há duas baixa-mares no mesmo dia, a de menor altura é designada de baixa-mar inferior em oposição à de maior altura, a que se dá o nome de baixa-mar superior. Elevação da maré é a altura de água, em preia-mar, acima do nível médio. As marés mortas ocorrem durante os quartos crescentes e minguantes e caracterizam-se por preia-mares de fraca elevação e baixa-mares pouco baixas. As marés vivas ocorrem durante a lua nova e cheia e caracterizam-se por preia-mares de grande altura e baixa-mares muito baixas. Nível médio da maré refere-se ao plano horizontal que passa pelos pontos de altura média de uma preia-mar e baixa-mar consecutivas. Preia-mar é o maior nível atingido pelas águas no fim da enchente. Tal como na baixa-mar os termos preia-mar inferior e preia-mar superior aplicam-se da mesma forma.

Na costa ocidental portuguesa, as marés são semi-diurnas, tendo cada ciclo uma periodicidade de 12 h e 25 m. Em Portugal, o Instituto Hidrográfico efectua as previsões de maré para os principais

portos nacionais. Em trabalho efectuado pelo LNEC (1996) é caracterizado o tipo de maré para Leixões, tendo sido obtidos os valores apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores típicos de maré em Leixões (baseado em LNEC, 1996).

Descrição dos tipos de maré	Cota (m)
Valor médio teórico de preia-mar de águas vivas (PMAV):	+3.50 (ZH)
Valor médio teórico de baixa-mar de águas vivas (BMAV):	+0.50 (ZH)
Valor médio teórico de preia-mar de águas mortas (PMAM):	+2.68 (ZH)
Valor médio teórico de baixa-mar de águas mortas (BMAM):	+1.32 (ZH)
Valor máximo teórico de preia-mar de águas vivas (PMAV):	+3.88 (ZH)
Valor máximo teórico de baixa-mar de águas vivas (BMAV):	+0.12 (ZH)

Nas simulações da variação da morfologia da costa é necessário considerar as oscilações locais associadas às marés astronómicas.

### 3.1.1.2 Marés meteorológicas

A sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica é uma oscilação temporária do nível das águas do mar, que pode ocorrer durante horas ou dias, como resultado de uma diminuição da pressão atmosférica ou da acção de ventos fortes e persistentes.

A sobrelevação é definida como a diferença positiva entre o nível do mar observado e o nível do mar previsto, enquanto que a diferença negativa é denominada de subelevação. A literatura anglo-saxónica designa por “storm surge” as sobrelevações extremas associadas a períodos de tempestade (Gama *et al.*, 1997).

Os níveis extremos associados à ocorrência simultânea de sobrelevações e marés vivas são fundamentais na avaliação dos riscos de inundação da costa pela acção do mar, no recuo da linha de costa e na dinâmica sedimentar do litoral. O conhecimento e o estudo deste fenómeno são por isso fundamentais.

As marés meteorológicas foram em geral subestimadas nos trabalhos marítimos e de planeamento costeiro até aos trabalhos pioneiros de Morais e Abecasis (1978) e de Taborda e Dias (1992).

Nesses trabalhos foram registados subidas do nível médio do mar de 0.5 m a 1.0 m em alguns locais da costa Oeste portuguesa, verificados durante as tempestades de 1973, 1978 e 1981 (Gama *et al.*, 1997).

Gama *et al.* (1997) estudaram os dados de sete estações maregráficas nacionais (Viana do Castelo, Aveiro, Cascais, Lisboa, Tróia, Sines e Lagos) entre Junho de 1986 e Maio de 1988. É referido nesse estudo que os resultados obtidos confirmam a importância do fenómeno de sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica como factor amplificador das acções de temporal, constituindo um parâmetro essencial em consideração no ordenamento do litoral português.

As variações devido a marés meteorológicas na costa portuguesa estão ainda pouco caracterizadas e a tabela 3.2 que se apresenta tem que ser entendida com cuidado, devido ao facto das séries temporais serem ainda curtas (Andrade e Freitas, 2002). Na tabela são expressos os níveis máximos de sobrelevação no período entre Junho de 1986 e Maio de 1988, de acordo com Gama *et al.* (1997), bem como os limiares entre as diversas classes de marés meteorológicas, de acordo com Andrade e Freitas (2002), de trabalho desenvolvido por Gama em 1994.

A divisão da tabela na classificação apresentada corresponde a probabilidades do nível de maré ser excedido. Assim, as classes de classificação das marés correspondem às probabilidades de ser excedida 95% das vezes (significativa), 99% das vezes (muito significativa) e 99.9% das vezes (extremamente significativa).

Tabela 3.2: Limiar entre as diferentes classes de marés meteorológicas, em diferentes locais da costa portuguesa, expressa em centímetros (adaptado de Andrade e Freitas, 2002).

Classificação da maré	Locais						
	Viana	Aveiro	Cascais	Lisboa	Tróia	Sines	Lagos
Significativa	39	31	26	23	28	29	33
Muito significativa	54	42	34	29	34	35	43
Extremamente significativa	90	67	43	39	41	43	60
Máximo observado	110	78	52	48	51	47	75

No período de cinco anos (1981-1985) de registos maregráficos de Leixões analisados em LNEC (1996), foram caracterizadas as sobrelevações e subelevações, realçando-se o facto de duas sobrelevações excederem 1 m. Foi registada uma sobrelevação máxima de 1.04 m a 30 de

Dezembro de 1981 e uma outra sobrelevação máxima de 1.02 m a 07 de Novembro de 1982. Foram ainda verificadas sobrelevações de pelo menos 70 cm num total de 9 dias entre os cinco anos considerados, todos durante meses de Inverno. Registam-se também subelevações inferiores a -20 cm em 6 dias da série de cinco anos, sendo o menor valor de -0.27 cm à meia-noite de 13 para 14 de Janeiro de 1981.

As sobrelevações são em geral maiores e mais frequentes que as subelevações devido ao facto de o território de Portugal continental se encontrar sob influência dos sistemas de baixas pressões e superfícies frontais características das latitudes médias do hemisfério Norte (LNEC, 1996).

Ainda de acordo com o LNEC (1996), o histograma das alturas de água efectivamente registadas durante um período de 29 anos em Leixões (1957-1985) revela o mínimo registo de +0.02 m (ZH) e o máximo de +4.67 m (ZH), enquanto os valores mais frequentes de registos foram os de +1.5 m (ZH) e +2.7 m (ZH).

As marés meteorológicas têm maior expressão nas zonas de costa “encaixadas” (baías, golfos, estuários, interiores de portos), do que nas costas expostas (à agitação e ventos). Os marégrafos ao longo da costa portuguesa estão localizados em zonas com diferentes “graus de abrigo”, o que poderá explicar as diferenças observadas. Por outro lado, ao longo dos anos, a construção de quebramares, docas e dragagem de canais terá alterado as condições hidrodinâmicas locais, afectando o registo das oscilações da água ao longo do tempo no mesmo marégrafo, localizado num ponto. Eventuais assentamentos da fundação das estruturas onde se localizam os marégrafos pode também motivar diferenças de registo ao longo do tempo, no mesmo marégrafo.

### **3.1.2 Subida Generalizada do Nível Médio das Águas do Mar**

As marés produzem flutuações diárias do nível das águas do mar. Variações sazonais também são detectadas devido a variações da temperatura da água do mar, grandes chuvadas ou flutuações no caudal desaguado dos rios para o mar. Outra importante variação do nível da água do mar deve-se ao avanço e recuo glacial ao longo de milhares de anos. Nos últimos 20 000 anos o nível do mar mudou mais de 100 m e estas variações estendem-se por mais de 3 milhões de anos (Komar, 1976).

Se os glaciares que restam derreterem, o nível médio das águas do mar pode subir ainda cerca de 60 m, cobrindo muitas das zonas costeiras mundiais. A cronologia das variações do nível médio das

águas do mar é visualizada na figura 3.4, compilando dados e propostas de diversos estudos em diferentes zonas do mundo. Apesar de diferenças no detalhe entre os numerosos estudosos deste assunto, é previsível que o nível das águas se tenha situado a cerca de 130 m abaixo do actual, entre 15000 e 20000 anos atrás. Desde esses tempos ocorreu uma rápida subida das águas, de cerca de 8 mm/ano até há cerca de 7000 anos e posteriormente ter-se-á verificado um abrandamento, passando a ser de cerca de 1.4 mm/ano, até ao presente nível (Komar, 1976).

A subida do nível do mar nos últimos 20000 anos deixou a costa fora de equilíbrio e a configuração da linha de costa desajustada do clima de agitação. Nos últimos 7000 anos a costa tem tentado o reajustamento natural, atenuando cabos e promontórios e enchendo estuários, em geral, numa tentativa de suavizar e linearizar a linha de costa (Komar, 1976).

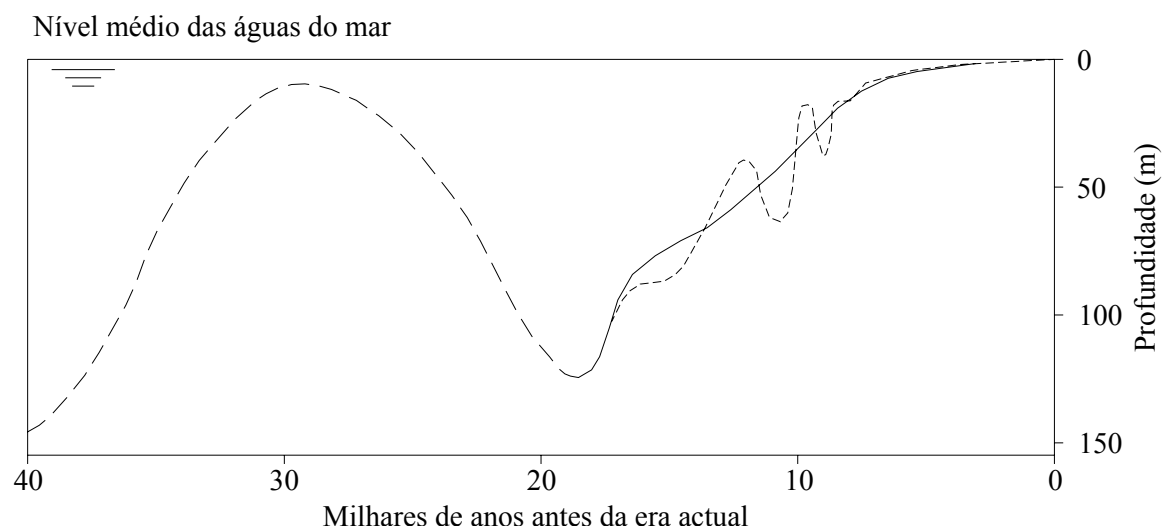


Figura 3.4: Flutuação do nível médio das águas do mar nos últimos 40000 anos, onde a curva a traço largo corresponde a dados mais limitados (adaptado de Komar, 1976).

Segundo Andrade e Freitas (2002), o nível médio das águas do mar ao longo da costa continental portuguesa subiu durante o século XX cerca de 15 cm. A expansão térmica do oceano seria o principal responsável por essa subida. No entanto, note-se que a erosão costeira observada depois de 1950 resulta em menos de 15% deste fenómeno.

O estudo de alterações no nível médio das águas do mar ao longo da costa portuguesa, deduzido a partir de registos de maré em Cascais e Lagos, com séries de 118 anos e de 92 anos respectivamente, indicam uma tendência de taxa de elevação do nível médio de  $1.3 \pm 0.1$  mm/ano e

de  $1.5 \pm 0.2$  mm/ano. Estes números são consistentes com as observações globais da subida do nível médio do mar no século XX (Andrade e Freitas, 2002).

As projecções apresentadas por Andrade e Freitas (2002), baseadas no terceiro relatório do IPCC (2001) “Impacts, Adaptation and Vulnerability (20 a 73) – Climate Change 2001”, situam-se entre os 11 cm e os 77 cm (30 cm a 50 cm, apertando o intervalo) para a subida entre 1990 e 2100. No entanto, alguns autores apresentam cenários mais dramáticos, enquanto outros são mais optimistas, apresentando estimativas que não ultrapassam os 20 cm.

A subida do nível do mar é talvez a maior consequência das alterações climáticas na costa continental portuguesa, mas são também esperadas alterações na direcção e altura das ondas e marés meteorológicas, conduzindo a eventos de maior energia e menores períodos de retorno. Não se esperam aumentos nas fontes sedimentares exteriores, apesar de alterações na precipitação e consequente transporte sedimentar aluvionar (Andrade e Freitas, 2002).

Nas simulações de médio e longo termo, considerando por exemplo horizontes de 50 ou 100 anos, é conveniente introduzir cenários da variação do nível médio do mar e verificar os impactes na variação da morfologia da costa.

### **3.1.3 Ventos**

O vento é um elemento climático essencial no processo de modelação das zonas costeiras. É fundamental no transporte de areias de praia e duna, sendo o principal interveniente no processo de formação das dunas costeiras. O regime de ventos é também importante quando se procede a uma análise do clima de agitação, pois é por acção do vento que se formam ondas na superfície do mar, geradas ao largo ou localmente.

De acordo com o Roteiro da Costa de Portugal (IH, 1990), nas zonas litorais, o regime de ventos é determinado pela sobreposição à circulação atmosférica de larga escala do efeito das brisas locais, com periodicidade diurna, geradas pelo desigual aquecimento e arrefecimento da terra e do oceano. A costa Noroeste de Portugal é, normalmente, varrida por ventos que apresentam um regime típico das regiões costeiras das latitudes médias situadas nas margens oceânicas orientais. A ocorrência de ventos com grandes intensidades nas regiões costeiras de Portugal está, frequentemente, associada

a depressões frontais localizadas sobre o Norte da Península Ibérica, acompanhadas de sistemas frontais em Portugal.

Para estudo e análise deste aspecto fundamental dos processos costeiros, foram solicitados ao Instituto de Meteorologia registos de ventos ao largo da costa de Aveiro. Desta forma seria também possível utilizar valores coerentes com o modelo de propagação e transformação de ondas. Assim, foram fornecidas pelo Instituto de Meteorologia as séries de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002 do estado da atmosfera no ponto de coordenadas de latitude 40.5 (N) e longitude 9.0 (W), a uma altura de 10 m da superfície do mar. A assimilação dos dados que permitiu chegar às séries de registos foi realizada pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), pelo que os valores apresentados não resultam de uma única medição, mas da aproximação mais verosímil que existe do estado da atmosfera nesse instante.

Os registos correspondem a 4 valores diários da velocidade média e rumo do vento, obtidos às 0:00 h, 6:00 h, 12:00 h e 18:00 h. Como são analisados 22 anos e 8 meses de registos, são avaliados 33116 valores. Todos esses valores foram divididos por quadrantes de rumos com 45° de amplitude, permitindo obter uma frequência de ocorrência e respectivas velocidades médias em cada quadrante. Na tabela 3.3 são apresentados esses resultados.

Tabela 3.3: Distribuição dos ventos de acordo com o seu rumo e respectivas velocidades médias.

Rumo	Inst. de Meteorologia		Adaptado de Ferreira (1993)		IHRH (1993)	
	Ocorrência	$v_{média}$ (m/s)	Ocorrência	$v_{média}$ (m/s)	Ocorrência	$v_{média}$ (m/s)
N	24.0%	4.9	18.6%	6.0	13.4%	3.0
NW	20.1%	4.3	21.9%	5.7	14.7%	4.5
W	10.6%	4.4	8.2%	4.9	12.4%	3.8
SW	11.3%	5.5	9.9%	6.4	8.1%	4.6
S	8.8%	5.6	8.1%	6.1	8.7%	5.6
SE	6.1%	4.0	7.9%	3.8	7.1%	3.7
E	7.6%	3.3	4.7%	4.3	23.0%	3.2
NE	11.5%	4.2	5.3%	4.1	5.8%	2.2
Calmas			15.5%	<0.5	6.8%	



A tabela 3.3 permite ainda a comparação com os registos apontados por Ferreira (1993) e pelo IHRH (1993). No primeiro caso, os valores correspondem à estação de S. Jacinto e procedeu-se à transformação de unidades das velocidades médias do vento, permitindo uma maior facilidade de comparação. No caso do IHRH (1993), a recolha corresponde a valores tri-horários da velocidade do vento na estação do Porto/Pedras Rubras e compreende o período de 1971 a 1985. Constatam-se diferenças nos valores que realçam a dificuldade de estabelecer um regime típico de ventos. As diferenças podem ser justificadas por os diferentes períodos de tempo em análise, bem como a diferente localização dos pontos de observação. No entanto, pode verificar-se alguma uniformidade nas principais tendências, como maiores velocidades nos rumos Sul e Sudoeste e maiores frequências de ocorrência dos quadrantes Norte e Noroeste.

A figura 3.5 representa a velocidade média dos ventos provenientes de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano. Como se verifica, para a generalidade dos rumos, as velocidades médias são superiores nos meses de Inverno, atingindo o valor máximo de 7.3 m/s, para o mês de Dezembro, com o rumo de SW. Os valores de 6.7 m/s e 6.6 m/s para o quadrante Sul, no mês de Dezembro e para o quadrante SW, em Janeiro, são respectivamente os valores seguintes mais elevados. As velocidades médias mais baixas são de 1.6 m/s, 1.7 m/s e 1.8 m/s e ocorrem nos meses de Verão, nomeadamente Julho e Agosto, com proveniências dos quadrantes SE e E.

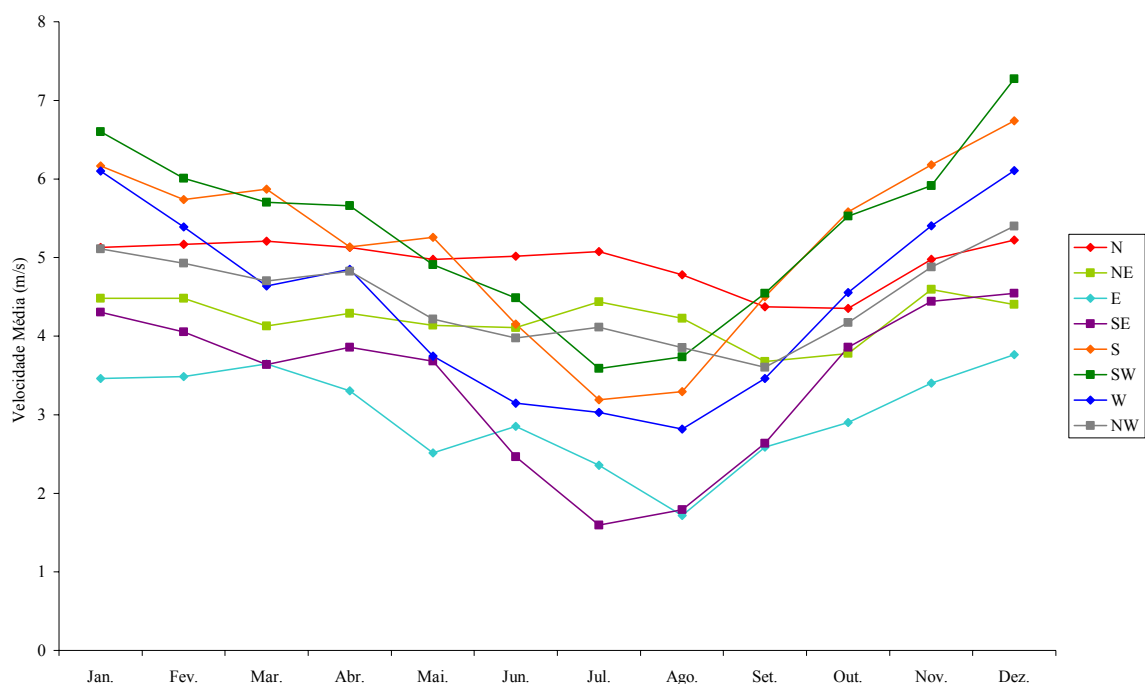


Figura 3.5: Velocidade média do vento, proveniente de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).

Os quadrantes com maior uniformidade de valores médios mensais da velocidade do vento ao longo do ano são os de Norte e Nordeste. De facto, a oscilação destes valores é inferior a 1.0 m/s ao longo de todo o ano. Os quadrantes Sul e Sudoeste são os que registam maiores diferenças ao longo do ano, com valores médios mensais de velocidade do vento no Verão menores que 4.0 m/s e excedendo as velocidades médias de 6.5 m/s no meses de Inverno.

A figura 3.6 representa as frequências de ocorrência de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano. Novamente, o comportamento de Verão e Inverno é distinto, sendo evidente uma preponderância dos quadrantes de Norte e Noroeste nos meses de Verão. Neste período, praticamente não se verificam ventos do quadrante de Sudeste. Pelo contrário, entre Novembro e Fevereiro, a frequência máxima de um quadrante ocorre apenas para 16.9% dos valores do mês de Dezembro e corresponde ao rumo de E, enquanto a mínima frequência é de 9.3% para o rumo de Noroeste, no mês de Janeiro. Nota-se portanto uma distribuição semelhante do vento por todos os quadrantes, ao longo do Inverno. A análise da média anual vem afectada pelo comportamento dos meses de Verão, como verificado na tabela anterior, com o domínio dos quadrantes N e NW.

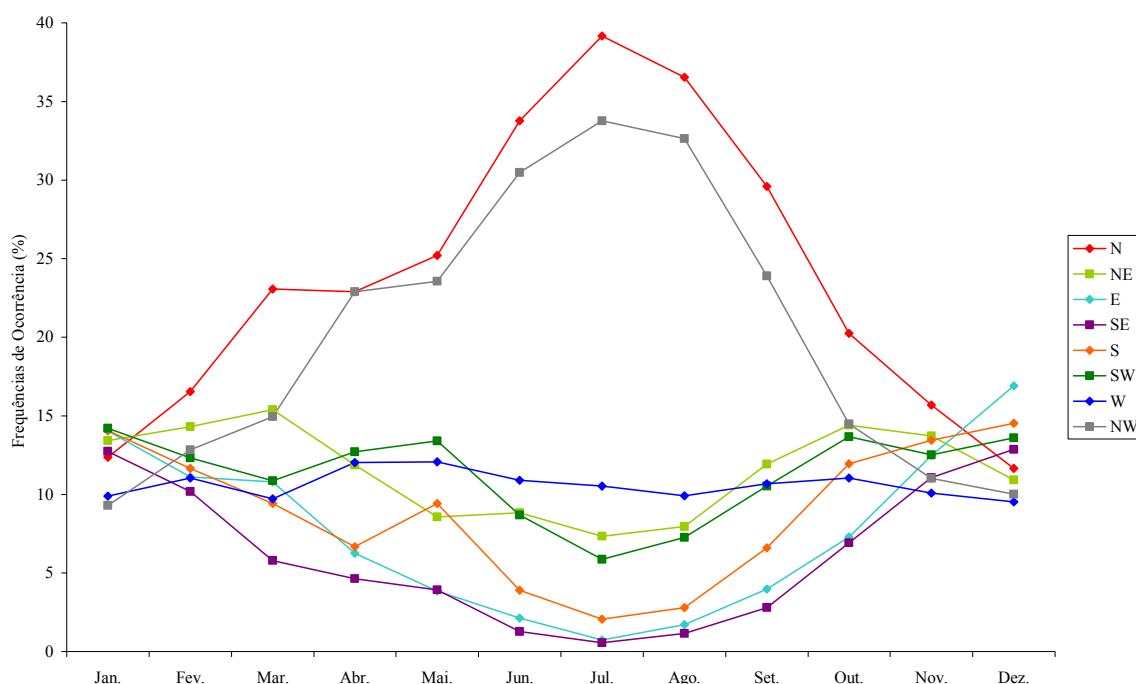


Figura 3.6: Frequências de ocorrência de vento de cada um dos quadrantes, em cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).

O rumo de SE, para os meses de Abril a Setembro, o rumo de E para os meses de Maio a Setembro e o rumo de S, para os meses de Junho a Agosto têm frequências de ocorrência inferiores a 5%, ou

seja, sem grande significado de ocorrência. O rumo de N, entre Fevereiro e Novembro, tem frequência de ocorrência superior a 15%, enquanto para o rumo de NW isso sucede entre Abril e Setembro. Além destes, apenas o rumo de NE durante o mês de Março e o rumo de E, durante o mês de Dezembro, superam os 15% de ocorrências. O rumo de W é o que apresenta uma maior regularidade de ocorrências no ano, representando ao longo de todos os meses cerca de 10% dos registos, sendo a menor frequência de ocorrência em Dezembro, com 9.5% dos valores e a maior probabilidade de ocorrência em Maio, com 12.1% das ocorrências desse mês.

As tabelas 3.4 a 3.6 pretendem resumir os dados do Instituto de Meteorologia. Da tabela 3.4 conclui-se que durante mais de 90% do período de registos, a velocidade do vento é inferior a 8.0 m/s. Os meses com registos de velocidades de vento superiores correspondem ao período de Inverno, destacando-se os meses de Outubro a Janeiro, com registos acima de 16.0 m/s. São três os registos de velocidades superiores a 16.0 m/s no mês de Outubro, dois nos meses de Dezembro e Janeiro e um em Novembro. Os meses de Julho e Agosto serão os de ventos mais calmos, com as velocidades a serem sempre inferiores a 12.0 m/s.

A tabela 3.5 está de acordo com os gráficos das figuras 3.5 e 3.6 e indica os valores médios mensais da velocidade do vento, para cada rumo, bem como a respectiva frequência de ocorrência em cada mês. Como já se referiu, a análise mensal permite verificar que para qualquer rumo, as velocidades de vento mais elevadas ocorrem nos meses de Inverno.

Por fim, a tabela 3.6 apresenta as frequências acumuladas para diferentes classes de velocidade do vento. As maiores velocidades de vento estão mais relacionadas com os quadrantes W a S. O quadrante SW ainda apresenta variação percentual das frequências de ocorrência para velocidades até 16.0 m/s. Dos oito registos superiores a 16.0 m/s, seis correspondem a proveniências do quadrante SW e os outros dois ao quadrante S. Para o quadrante E não se registaram velocidades superiores a 12.0 m/s.

Em resumo, como já foi possível constatar, na costa ocidental portuguesa, o regime de ventos é caracterizado por ventos dominantes dos rumos dos quadrantes N e NW. O regime é muito irregular entre anos, mas uma das características mais constantes é o predomínio dos ventos de N (nortada) nos meses de Verão. Estas constatações vão ao encontro do descrito por outros autores.

Tabela 3.4: Frequências acumuladas da velocidade de vento ( $v$ ), referentes a cada mês do ano e ao ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).

$v$ (m/s)	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Ano
<1	2.2	2.6	2.0	2.9	2.6	2.4	1.8	3.2	3.7	3.3	2.5	1.8	2.6
<2	9.6	11.0	10.1	11.2	11.5	10.8	9.2	13.0	15.5	13.6	10.4	9.0	11.2
<3	24.4	25.6	26.6	25.1	27.9	27.5	23.4	30.8	35.9	31.3	23.9	21.5	27.0
<4	41.0	43.8	45.0	41.9	47.1	48.2	44.6	52.1	57.1	49.2	42.2	37.6	45.8
<5	55.5	57.1	59.8	56.2	63.6	66.0	65.7	71.9	74.4	65.0	56.7	51.9	62.0
<6	67.5	69.8	72.7	69.5	76.3	83.1	82.9	85.5	85.3	77.0	68.5	63.5	75.2
<7	76.8	78.2	81.9	80.9	87.0	92.0	92.9	92.8	92.5	85.6	78.1	72.3	84.3
<8	83.5	85.9	88.2	89.2	93.7	96.2	97.5	97.4	96.4	91.2	85.9	80.4	90.5
<9	88.9	91.8	93.0	94.5	97.1	98.8	99.4	99.3	98.3	95.7	91.7	87.6	94.7
<10	93.3	95.6	96.7	97.6	99.1	99.5	99.9	99.9	99.0	97.5	95.3	92.3	97.2
<11	96.3	97.6	98.5	99.0	99.6	99.8	99.9	99.9	99.6	98.6	97.8	95.9	98.6
<12	97.8	98.7	99.5	99.8	99.8	99.9	100	100	99.9	99.1	98.9	97.8	99.3
<13	99.1	99.5	99.9	99.9	99.9	99.9	100	100	100	99.4	99.5	98.9	99.7
<14	99.5	99.7	99.9	100	100	100	100	100	100	99.8	99.8	99.5	99.8
<15	99.9	99.8	100	100	100	100	100	100	100	99.8	99.9	99.8	99.9
<16	99.9	100	100	100	100	100	100	100	100	99.9	99.9	99.9	100
<17	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99.9	100	100	100
<18	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<19	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 3.5: Valores médios da velocidade de vento ( $v$ ), em m/s, por classes de rumos e respectivas frequências de ocorrência, referentes a cada mês do ano (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).

Mês	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	%	$v$	%	$v$	%	$v$	%	$v$	%	$v$	%	$v$	%	$v$	%	$v$
Jan.	12.4	5.1	13.4	4.5	14.0	3.5	12.7	4.3	14.1	6.2	14.2	6.6	9.9	6.1	9.3	5.1
Fev.	16.5	5.2	14.3	4.5	11.1	3.5	10.2	4.1	11.7	5.7	12.3	6.0	11.0	5.4	12.8	4.9
Mar.	23.1	5.2	15.4	4.1	10.8	3.6	5.8	3.6	9.4	5.9	10.9	5.7	9.7	4.6	14.9	4.7
Abr.	22.9	5.1	11.9	4.3	6.3	3.3	4.6	3.9	6.7	5.1	12.7	5.7	12.0	4.8	22.9	4.8
Mai.	25.2	5.0	8.6	4.1	3.9	2.5	3.9	3.7	9.4	5.3	13.4	4.9	12.1	3.7	23.6	4.2
Jun.	33.8	5.0	8.8	4.1	2.1	2.8	1.3	2.5	3.9	4.2	8.7	4.5	10.9	3.1	30.5	4.0
Jul.	39.2	5.1	7.3	4.4	0.7	2.4	0.6	1.6	2.1	3.2	5.9	3.6	10.5	3.0	33.8	4.1
Ago.	36.5	4.8	8.0	4.2	1.7	1.7	1.2	1.8	2.8	3.3	7.3	3.7	9.9	2.8	32.6	3.9
Set.	29.6	4.4	11.9	3.7	4.0	2.6	2.8	2.6	6.6	4.5	10.5	4.5	10.7	3.5	23.9	3.6
Out.	20.2	4.4	14.4	3.8	7.3	2.9	6.9	3.9	12.0	5.6	13.7	5.5	11.0	4.6	14.5	4.2
Nov.	15.7	5.0	13.7	4.6	12.5	3.4	11.1	4.4	13.5	6.2	12.5	5.9	10.1	5.4	11.0	4.9
Dez.	11.7	5.2	10.9	4.4	16.9	3.8	12.9	4.5	14.5	6.7	13.6	7.3	9.5	6.1	10.0	5.4

Ferreira (1993) indica que os ventos de maior velocidade média pertencem ao quadrante SW, com velocidades superiores a 20 km/h. A distribuição da intensidade do vento, ao longo do ano, possui uma variação sazonal marcada. Os meses que registam os menores valores de velocidade média do vento são Julho e Agosto (14.2 km/h) e Setembro (14.8 km/h), sendo os que registam os maiores valores Dezembro (19.7 km/h), Janeiro (19.5 km/h) e Fevereiro (20.2 km/h), valores apontados pelo Roteiro da Costa de Portugal (IH, 1990).

Tabela 3.6: Frequências acumuladas (% em relação ao total das 33116 observações) distribuídas por classes de rumos e de velocidade do vento (baseado em dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002).

$v$ (m/s)	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
<2	1.5	1.3	1.5	1.1	1.0	1.1	1.7	2.0
<3	4.2	3.5	3.4	2.3	1.9	2.4	3.7	5.4
<4	8.4	5.9	5.4	3.6	3.0	4.0	5.7	9.8
<5	12.9	7.9	6.5	4.4	4.1	5.4	7.0	13.7
<6	17.2	9.4	7.1	5.0	5.1	6.8	8.1	16.5
<7	20.2	10.3	7.3	5.4	6.0	8.0	8.8	18.3
<8	22.0	10.9	7.4	5.7	6.8	9.0	9.4	19.2
<9	23.2	11.3	7.5	5.8	7.5	9.7	10.0	19.7
<10	23.7	11.4	7.5	6.0	8.0	10.3	10.3	19.9
<11	23.9	11.5	7.6	6.0	8.3	10.8	10.5	20.0
<12	24.0	11.5	7.6	6.1	8.6	11.0	10.5	20.1
<13	24.0	11.5	7.6	6.1	8.7	11.1	10.6	20.1
<14	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.2	10.6	20.1
<15	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.2	10.6	20.1
<16	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.3	10.6	20.1
<17	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.3	10.6	20.1
<18	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.3	10.6	20.1
<19	24.0	11.5	7.6	6.1	8.8	11.3	10.6	20.1

Apresenta-se também um resumo das principais conclusões extraídas de um trabalho desenvolvido pelo IHRH (1993), para a caracterização das condições naturais de uma zona costeira frontal a Leça da Palmeira. O estudo do IHRH (1993) para o ponto localizado nas coordenadas 41° 12' 00" N e 08° 45' 00" W (a Noroeste do porto de Leixões) refere que o valor máximo tri-horário de velocidade observado, no período entre 1971 e 1985, na estação do Porto/Pedras Rubras foi de 22.9 m/s. Desse trabalho, pode concluir-se que durante quase 90% do tempo a velocidade do vento é inferior a 6.5 m/s. Os meses com registos de velocidades de vento superiores correspondem a

períodos de Inverno, destacando-se o mês de Novembro, com registos acima de 17.5 m/s ainda a ter algum significado percentual nos dados recolhidos. Os meses de Junho a Setembro serão os de ventos mais calmos, com velocidades inferiores a 0.5 m/s a terem cerca de 10% de ocorrências.

Ainda de acordo com o IHRH (1993), os valores médios anuais da velocidade do vento situam-se entre os 2.2 m/s quando provenientes do quadrante de Nordeste e os 5.6 m/s, com proveniência de Sul. Numa análise mensal, verifica-se que para qualquer rumo, os valores médios mais elevados ocorrem nos meses de Inverno. Por fim, indicam-se as frequências de períodos de calma, que correspondem a 6.8% do total de observações. Verifica-se que o rumo com um maior número de registo é o de E, enquanto o rumo de NE é o que tem menor número de observações. As proveniências de vento de E são no entanto relacionadas com velocidades de vento relativamente baixas, sendo que 21% são menores que 5 m/s. As maiores velocidades de vento estarão mais relacionadas com os quadrantes de S.

Por último, Pereira (2000) indica dados na estação de Aveiro/Barra referidos em o Clima de Portugal, de 1970, concluindo que os ventos mais frequentes são os que possuem rumos de N e NW e as velocidades médias mais elevadas ocorrem para os ventos provenientes de SW e S. Estes resultados aproximam-se dos aqui indicados, incluindo ainda o facto da distribuição da intensidade do vento possuir variação sazonal vincada.

Nas simulações de variação da morfologia de costa, a acção directa dos ventos ou indirecta (através da agitação ao largo ou da agitação local), terá de ser considerada com base em dados locais ou regionais. Desta forma, dado que a série de dados mais actual e mais longa corresponde aos elementos solicitados ao Instituto de Meteorologia (ao largo da costa de Aveiro), e como se verificou, existe alguma concordância com os outros elementos analisados, serão os dados do Instituto Meteorológico os utilizados quando necessário, nas aplicações expostas posteriormente.

### **3.1.4 Agitação Marítima**

Ondas, vagas, seichas e tsunamis são diferentes tipos de agitação marítima. As seichas são ondas de oscilação de longo período, com particular importância no estudo dos estados de agitação em interior de portos, nomeadamente associados a fenómenos de ressonância. Os tsunamis são ondas de translação, normalmente associadas a fenómenos sísmicos de consequências previsivelmente catastróficas, sendo de realçar a elevada incapacidade científica na sua previsão. As vagas resultam

do efeito de ventos locais e originam um estado de agitação irregular, podendo coexistir com ondas provenientes de outros temporais. As ondas marítimas propagam-se longe da zona onde foram geradas, sendo por isso, mais regulares devido a um efeito natural de “filtro”. Em todo o caso existe variabilidade das características das ondas dentro de um mesmo estado de agitação, variabilidade que pode ser representada por espectros de energia de banda larga ou banda estreita, consoante a maior ou menor irregularidade de alturas e períodos de onda.

Ao contrário das transformações morfológicas da costa, que são avaliadas em escalas temporais de dias, meses ou vários anos, os fenómenos de agitação marítima designados por ondas e vagas envolvem uma caracterização de períodos em que a escala dos tempos é da ordem dos segundos. A escolha das características da agitação representativas para a evolução morfológica da costa é por isso uma associação de diferentes escalas temporais que merece alguma análise. Esta análise visa possibilitar a consideração de estados de agitação representativos nas simulações hidromorfológicas e vai ser apresentada para a costa ocidental portuguesa.

Carvalho e Barceló (1966), verificam que na costa ocidental portuguesa, as alturas significativas mais frequentes são de 1 m a 2 m, com 45% das ocorrências, sendo o máximo registado de 11 m, o que não significa que não ocorram máximos superiores em episódios de temporal. A frequência de valores superiores a 3 m corresponde a 15%, e apenas 2% para alturas superiores a 6 m e 6% para os períodos de calma. Os valores máximos mensais das alturas significativas mostram uma variabilidade acentuada, verificando-se valores de 11 m em Dezembro e Janeiro, e de 4 m em Julho. Os valores mais frequentes de período significativo da onda variaram entre os 9 s e os 11 s, sendo o valor mínimo observado de 6 s e o máximo de 18 s. Este parâmetro mantém-se praticamente constante ao longo de todo o ano, manifestando-se uma ligeira tendência para diminuir nos meses de Junho, Julho e Agosto, como é referido por Ferreira (1993).

A altura de onda significativa e o respectivo período, para as ondas ao largo da costa Oeste portuguesa, são em comum de 2 m a 2.5 m e de 9 s a 11 s, com proveniência dos quadrantes WNW e NNW e geradas por ventos de altas latitudes do Atlântico Norte. Na costa Oeste, o mar calmo é uma exceção, enquanto as ondas ultrapassam com frequência os 5 m de altura significativa ao largo, entre Outubro e Março (Andrade e Freitas, 2002).

O Instituto Hidrográfico dispõe de três bóias ondógrafo na costa portuguesa (Leixões, Sines e Faro). Foram solicitados e consideraram-se apenas os registos da bóia de Leixões, por ser esta a



mais próxima e naturalmente a mais representativa da agitação ao largo do trecho Douro-Mondego. A média dos dados foi efectuada no âmbito do presente trabalho.

A localização das estações ondógrafo em Leixões ao longo dos tempos foi a que se apresenta na tabela seguinte.

Tabela 3.7: Localização das estações ondógrafo de Leixões ao longo do tempo.

Período das Observações	Profundidade (m)	Latitude (N)	Longitude (W)
Out. 81 a Jan. 85	30	41° 10' 42"	8° 44' 48"
Jul. 93 a Jul. 96	110	41° 12' 12"	9° 05' 18"
Jul. 96 a Dez. 03	83	41° 19' 00"	8° 59' 00"

A forma de armazenamento da informação efectuada pelo Instituto Hidrográfico é descrita do seguinte modo: em condições normais a aquisição dos dados é efectuada de 3 h em 3 h, durante períodos de 30 m. Em condições de temporal, ou seja, quando a altura significativa excede 3 m, os períodos de aquisição de 30 m são apenas espaçados de pequenos intervalos necessários ao processamento dos dados. Os dados são adquiridos a uma taxa de digitalização de 1.28 amostras por segundo. O limite mínimo de duração para que um conjunto de dados (registo) seja tratado é de 10 m. Os grupos data/hora estão referidos à hora local e correspondem ao início dos registos, ou seja, correspondem às 0:00 h, 3:00 h, 6:00 h, 9:00 h, 12:00 h, 15:00 h, 18:00 h e 21:00 h do dia. Para tratamento estatístico, considerou-se que os registos com intervalos de recolha inferior às 3 h habituais e com altura de onda significativa superior a 3 m seriam registos de temporal. Quando existem pelo menos dez registos deste tipo a ocorrerem durante um período superior a 8 h, considerou-se que o temporal foi persistente.

Foram recolhidos os valores relativos à altura significativa ( $H_s$ ), que correspondem à média do terço mais elevado das alturas de onda de zero ascendente. Foram recolhidos também os valores do período médio ( $T_{Hs}$ ), correspondente à média dos períodos das ondas que foram utilizadas no cálculo da altura significativa. Por fim, registaram-se desde 1993 os valores da direcção média associada do período de pico ( $D_{Tp}$ ). As direcções estão referidas ao Norte verdadeiro, tendo-se considerado os valores para a declinação magnética de 6° W entre 1993 e 1997 e de 5° W entre 1998 e 2003.

A agitação ao largo é entendida como agitação em águas profundas, que corresponde a uma profundidade superior a metade do comprimento de onda. Para as profundidades a que se encontra a bóia, as ondas mais altas são ligeiramente afectadas pela profundidade dos fundos (Coelho e Veloso-Gomes, 2003).

O número de registos trabalhado é significativo, mas como se verifica na tabela 3.8, estes registos denotam uma série de falhas nas sequências. A tabela apresenta o número total dos registos apresentados pelo Instituto Hidrográfico para cada mês do período analisado, sem distinguir as situações de aquisição mais frequente de dados, em situações de temporal. As situações comuns de recolha de dados originam 240 registos mensais (oito por dia), mas facilmente se constata que é raro o mês com esse número de registos. Os meses com número de registos superior a 240, revela necessariamente a ocorrência de temporais com aquisição de dados mais frequente.

As séries mais longas de aquisição consecutiva de dados correspondem aos períodos de Outubro de 1981 a Janeiro de 1983, de Outubro de 1983 a Janeiro de 1985 e de Fevereiro de 1998 a Abril de 2000. Nestes períodos existiram falhas de registos em apenas alguns dias. De Fevereiro de 1985 a Junho de 1993 não se efectuaram nenhuns registos. Desde essa data, a maior paragem na aquisição de dados corresponde aos períodos de Fevereiro a Agosto de 1995 e de Maio de 2000 a Abril de 2001.

Note-se que os registos da direcção média da ondulação associada ao período de pico ( $D_{Tp}$ ) só existem desde 1993, apesar de desde essa altura apresentarem um número de registos um pouco superior ao das outras duas grandezas. Assim, as tabelas 3.8 e 3.9 não se aplicam aos registos dos rumos de ondulação.

A tabela 3.9 mostra quantos foram os registos em condição de temporal. Algumas situações de temporal não terão sido registadas por problemas técnicos relacionados com o ondógrafo, ou deficiências de transmissão de dados para terra. No período de 1981 a 1985 são muito escassos os registos de temporal, provavelmente relacionados com a forma de aquisição de dados durante esse período e com a localização da própria bóia.

Tabela 3.8: Número total de registos efectuados nos diferentes meses do período em análise (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	$\Sigma$
1981										192	237	292	721
1982	245	184	240	239	247	238	215	221	232	195	218	195	2669
1983	176									104	166	239	685
1984	241	206	237	202	234	222	226	242	218	225	218	210	2681
1985	136												136
1993							28		18	176	80	133	435
1994	90	243	179		44	234	202	125	122	29	22	212	1502
1995	116								42	20			178
1996			111	204	109	107	112	228	235	235	252	206	1799
1997	55		235	233	172	48		201	234	221	330	21	1750
1998		220	226	264	217	166	97	191	180	238	259	411	2469
1999	124	162	276	228	235	234	238	225	257	292	139	309	2719
2000	270	267	245	263									1045
2001					73	236	239	245	238	165		247	1443
2002	312	297	242	233	251	198	226	246	82		56	310	2453
2003	261	246	284	243	245	240	245	247	238	293	230	251	3023
$\Sigma$	2026	1825	2275	2109	1827	1923	1828	2171	2096	2385	2207	3036	25708

Tabela 3.9: Número de registos em condições de temporal persistente, efectuados nos diferentes meses do período em análise (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	$\Sigma$
1981												85	85
1982													0
1983													0
1984													0
1985	17												17
1993										57		17	74
1994	20	100										87	207
1995	18												18
1996				7							72		79
1997					3						145		148
1998				101					20		30	221	372
1999	67	36	59	12					57	108		98	437
2000	59	54		38									151
2001													0
2002	112	104	3		16						35	86	356
2003	55	43	47	13						55	54	6	273
$\Sigma$	348	337	109	171	19	0	0	0	77	220	336	600	2217

O mês de Dezembro é aquele que maior número de registos de temporal verifica (cerca de 20% dos verificados no mês), enquanto nunca se registaram temporais em Junho, Julho e Agosto. Os anos de 1993, 1998 e 1999 são os que verificam maiores percentagens de temporal, ultrapassando ligeiramente os 15% de registos do ano. Em termos totais, 8.6% dos registos são em situação de temporal.

De todos os registos de temporal, foi efectuada uma análise detalhada, permitindo realçar 50 situações consideradas de temporal persistente, correspondendo a 2124 registos com uma frequência média de aquisição de dados de 47 m. O temporal registado com maior período de

duração (quase 164 h) foi o que decorreu entre 26 de Dezembro de 1998 e 1 de Janeiro de 1999, durante o qual se registaram 230 valores de altura de onda significativa e respectivos períodos, bem como rumos de ondulação. Nesse período, o valor máximo de altura de onda significativa foi de 8.89 m e o valor médio foi de 5.31 m. Durante doze vezes foram registados temporais com duração superior a 48 h. A média de duração destes temporais é de aproximadamente 34 h. Realça-se novamente o facto de problemas associados com a aquisição de dados da bóia não permitirem recolher a informação de todos os temporais e portanto a existência de falhas e lacunas nas séries de registos.

#### **3.1.4.1 Rumos dominantes**

Ao contrário dos registos de alturas e períodos de onda, os registos de rumos só existem desde 1993. Foram trabalhados 20227 registos correspondendo a uma média de 1839 registos por cada ano em análise. O ano com menor recolha de dados foi o de 1995 com apenas 195 registos e 2003 foi o ano de maior número de registos, com 3017 valores. Em termos mensais, existe algum equilíbrio nos dados existentes, sendo o mês de Maio aquele que menor informação detém (1346 registos) e o mês de Dezembro o que maior número de registos possui (2241).

Para o tratamento da informação relativa aos rumos da ondulação foram definidas várias classes. As classes correspondem a sectores de 22.5°, centrados na direcção que dá o nome à classe, como se visualiza na figura 3.7. Esta definição de classes permite uma comparação com os valores descritos por Barata *et al.* (1996), onde são analisados registos com base em bóias ondógrafo direccionais, colocadas em zonas próximas do Cabo Mondego e da barra de Aveiro durante os anos de 1990 a 1993 e 1992 a 1993, respectivamente.

Nesse trabalho, é referido que relativamente à direcção média do período de pico na bóia do Cabo Mondego, a frequência de ocorrência de rumos do sector NW é de perto de 45% e o conjunto dos quadrantes NNW, NW e WNW ultrapassam os 90% de ocorrências. Para o ondógrafo da barra os resultados são menos fiáveis, por corresponderem a um período de registos pequeno e porque a bóia foi colocada a menores profundidades, onde se fazem sentir os efeitos de refacção. Os resultados são, no entanto, semelhantes, apresentando um aumento de ocorrências no sector de NW.

Nos dados recolhidos em Leixões, pode verificar-se que o quadrante de Noroeste é aquele com predominância de origem da ondulação, com 88.4% dos registos a situarem-se no intervalo de 11.25° a 78.75°. O sector NW representa 42.4% do total de registos de rumos. Todas as ondas com proveniência do quadrante de Sudoeste representam apenas 3.9% do total de registos. A classe de direcção de ondulação de Oeste (W) corresponde a 7.7% dos registos. Assim, estes resultados aproximam-se significativamente dos valores de Barata *et al.* (1996).

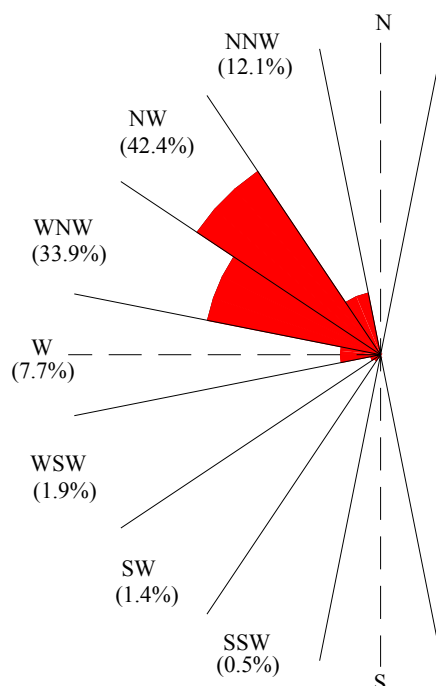


Figura 3.7: Rosa de rumos com a representação das classes de direcção de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

Nos últimos anos de registos, nota-se uma ligeira rotação da tendência de proveniência de rumos mais para WNW, retirando alguma importância aos rumos de NW e NNW. A comparação da figura anterior com os valores apresentados em Coelho e Veloso-Gomes (2003), ou a análise do gráfico da figura seguinte permitem comprovar este facto. No entanto, os anos de 1993 e 1995 são representados por uma quantidade de registos relativamente baixa (523 e 195 registos, respectivamente, quando a média de dados corresponde a cerca de 1800 registos por ano). O facto do período da série de dados abranger apenas onze anos é também insuficiente para validar uma tendência de rotação nos rumos em extrapolação de projecções para o futuro.

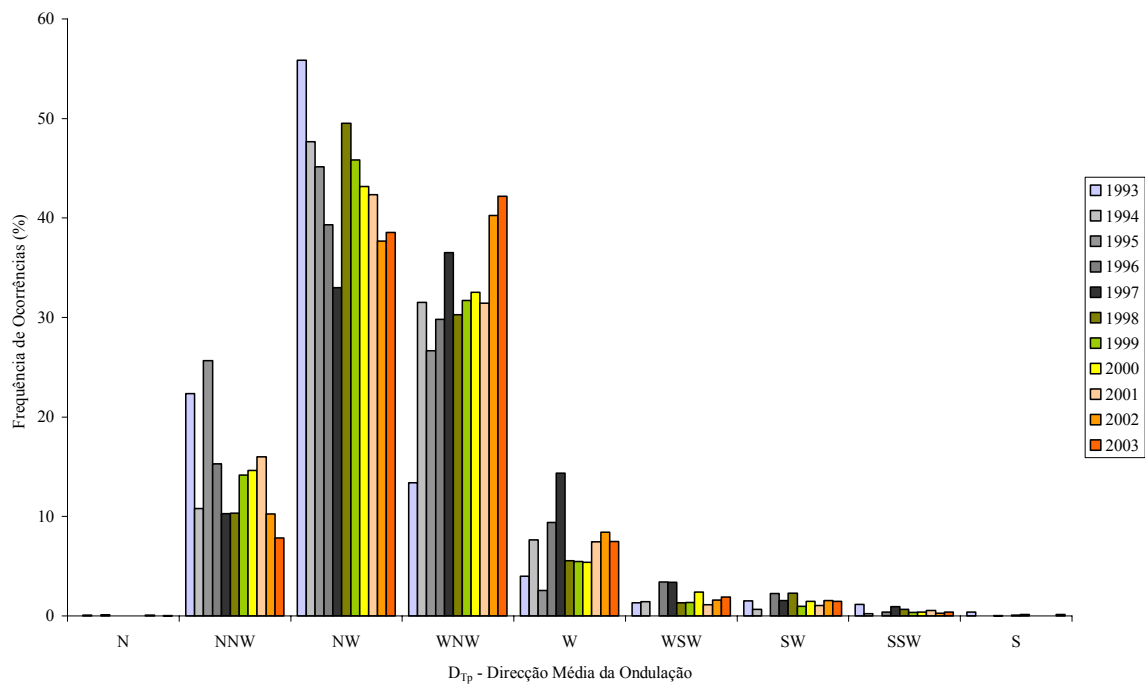


Figura 3.8: Distribuição da direcção de ondulação ao longo dos anos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

A figura 3.9 representa graficamente a frequência de distribuição dos rumos de agitação na bóia de Leixões, no período compreendido entre 1993 e 2003 e em simultâneo permite a comparação com os registos em temporal persistente. Para esta representação gráfica, contabilizaram-se 20214 registos totais, sendo 2022 em situação de temporal persistente.

O rumo de WNW assume maior relevo em temporal, bem como o rumo de NW. Assim, nas situações de maior altura de onda, os quadrantes de NW e WNW representam com igual importância, 91.0% do total de registos. Apesar de reduzir o seu significado, o quadrante de Oeste mantém mais de 7% dos registos, enquanto que o quadrante de NNW deixa de ter significado nas situações de temporal. Os temporais provenientes de qualquer dos quadrantes de Sudoeste praticamente não são representados pelos registos em Leixões.

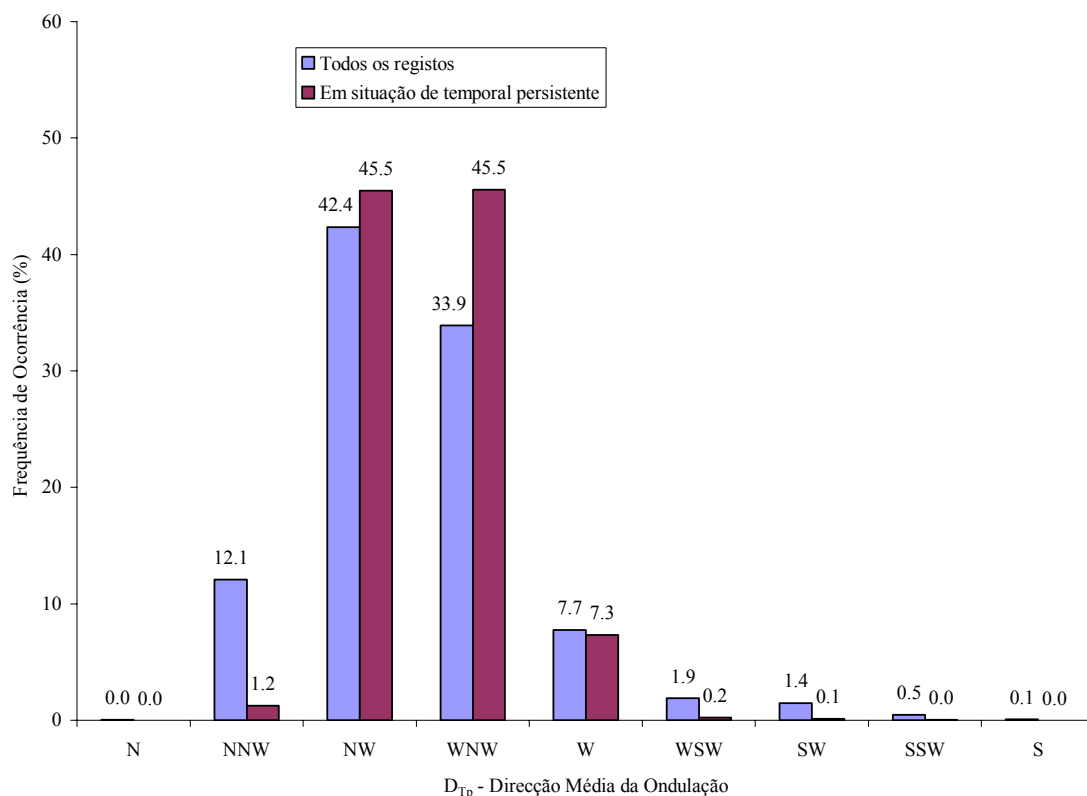


Figura 3.9: Comparação da direcção média anual de ondulação com as situações de temporal persistente (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

A distribuição de rumos ao longo dos meses do ano não revela comportamentos bem definidos, mas denota-se alguma tendência para nos meses de Verão a ondulação ser mais proveniente do Norte. Esta tendência é também referida por Barata *et al.* (1996), onde se conclui que na época de Verão estão predominantemente associados valores dos sectores W a NNW, que representam as componentes geradas pelos ventos predominantes no Verão (ventos N e NW).

Para o rumo de NNW foram obtidos 2438 registos e denota-se uma frequência crescente de ocorrências desde Janeiro até Junho, reduzindo depois até Dezembro. Para os quadrantes de WSW e SW não foi registada qualquer ocorrência durante o mês de Julho. O quadrante de WNW é o mais representado nos meses de Janeiro, Abril e Novembro, sendo o quadrante NW, o mais frequente em todos os outros meses do ano. O quadrante Oeste excede os 10% de ocorrências apenas em dois meses (Abril e Dezembro), mas nesses casos representa cerca de 13% dos registos.



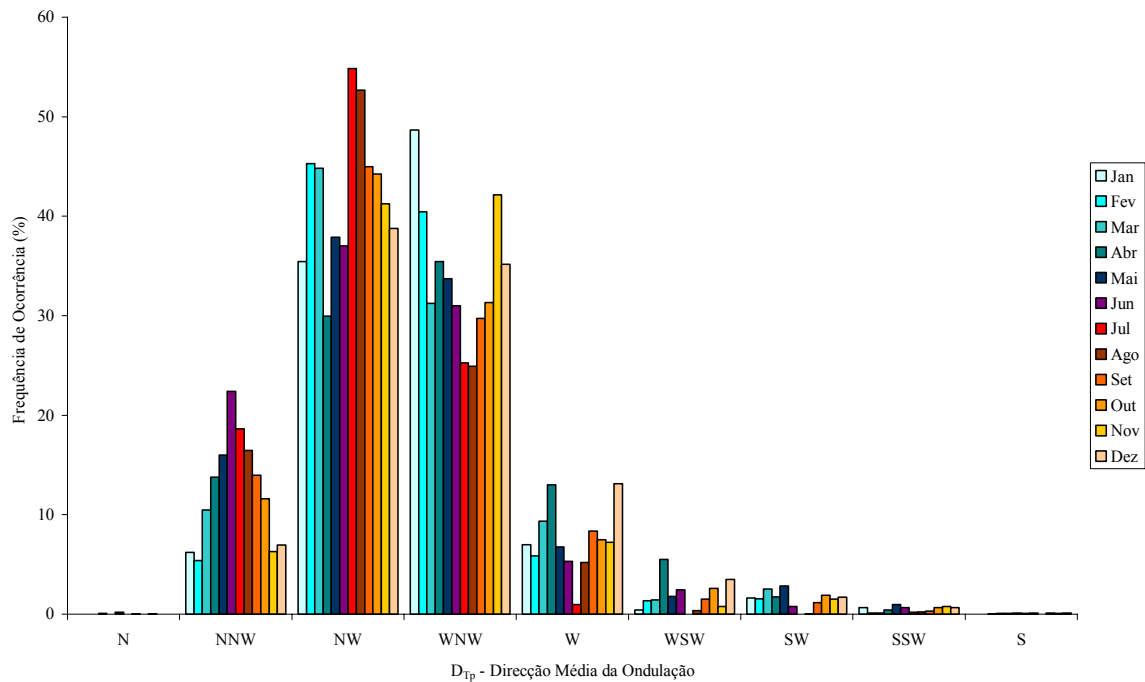


Figura 3.10: Distribuição mensal da direcção média de ondulação (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

### 3.1.4.2 Alturas e períodos de onda

Agruparam-se os registos de alturas de onda significativa e respectivos períodos de onda em classes de um metro e de um segundo respectivamente. Considerou-se todos os intervalos abertos à esquerda e fechados à direita, de acordo com Barata *et al.* (1996), permitindo assim uma comparação com os resultados desse estudo.

As figuras 3.11 a 3.14 correspondem à representação gráfica dos registos obtidos. Para estas duas grandezas é imperiosa uma análise conjunta dos resultados globais e dos resultados mensais. De facto, verificam-se diferenças significativas nos registos dos meses de Inverno, quando comparados com os registos dos meses de Verão. Nos meses de Verão, a média dos valores de altura significativa desce, não se verificando nenhum registo com valores superiores a 4.5 m para os meses de Junho, Julho e Agosto. A situação em termos de períodos de onda correspondentes é idêntica, verificando-se a mesma descida dos valores médios do período nos meses de Verão. Para os meses de Maio a Agosto não há registo de períodos superiores a 15 s.

A distribuição de registos por cada um dos meses do ano é equilibrada e dos 25708 registos, seria de esperar uma distribuição de cerca de 2140 registos por cada mês. Os meses com menor número de registos são Fevereiro, Maio e Julho (1825, 1827 e 1828 registos respectivamente) e o mês com maior número de registos é Dezembro (3036).

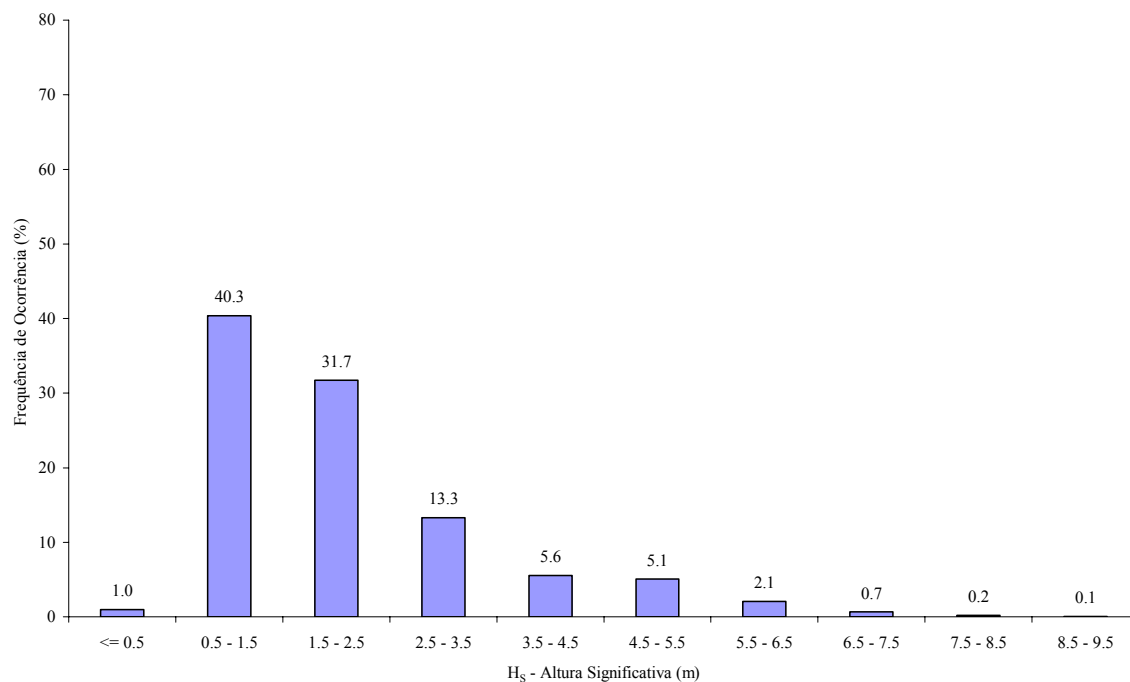


Figura 3.11: Alturas de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

Em termos de alturas significativas, só por 18 vezes se ultrapassaram registos de 8.5 m (nove vezes em Outubro, sete vezes em Dezembro e duas em Janeiro). Para os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro, os registos inferiores a 1.5 m representam cerca de 20% do total de registos do próprio mês, enquanto para os meses de Julho e Agosto ultrapassam os 70%. O número de registos nas duas primeiras classes (até 1.5 m de altura significativa) corresponde a 41.3% do total de registos.

Para ondas entre 1.5 m e 2.5 m de altura significativa, os registos dos diversos meses aproximam-se da média de 31.7%, ou seja, não há predomínio dos meses de Verão ou Inverno. A partir desta classe, os meses de Verão passam a ter um número muito reduzido de registos, enquanto os meses de Inverno (Novembro a Março) têm ainda resultados significativos. Para os meses de Inverno, as ondas entre 2.5 m e 3.5 m de altura, representam cerca de 20% dos registos do próprio mês. A percentagem de registos nesta classe de ondas é de 13.3% dos registos totais, enquanto as classes

superiores a esta representam 13.7% do total de registos e dividem-se de forma decrescente ao longo das diversas classes. Para esta percentagem praticamente só contribuem os meses de Inverno.

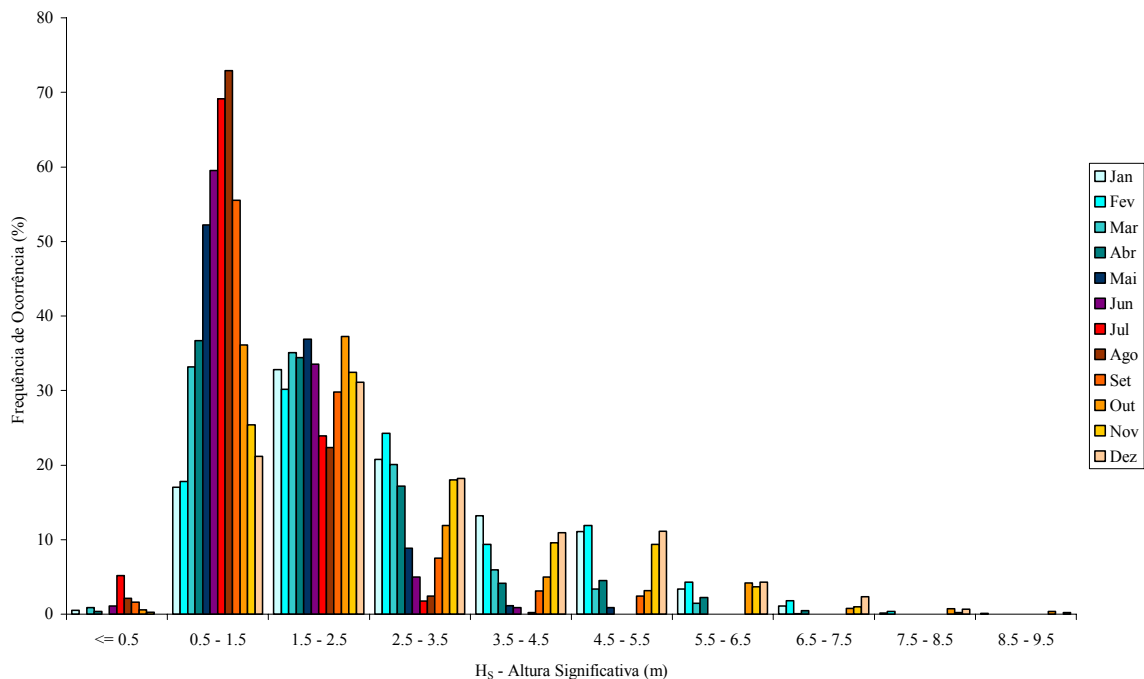


Figura 3.12: Distribuição mensal das alturas de onda significativa (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

Relativamente a alturas significativas, Barata *et al.* (1996) referem os resultados de 35% para frequências de ocorrência na classe de ondas entre os 1.5 m e os 2.5 m e de 26% para a classe entre os 0.5 m e os 1.5 m. Estes valores representam portanto o deslocamento das frequências no sentido das maiores alturas de onda. Barata *et al.* (1996) referiam a classe mais representativa entre os 1.5 m e os 2.5 m, quando em Leixões, com um período de registos mais longo se verifica que a classe mais representativa é entre 0.5 m e 1.5 m.

A análise dos períodos de onda permite retirar conclusões semelhantes às retiradas para os valores de altura significativa. Assim, há que distinguir os registos de Verão e de Inverno.

Os meses de Inverno não têm representatividade nas percentagens obtidas nas classes inferiores a 7 s. Os meses de Verão perdem significado nas classes superiores a 13 s. Assim, poderá concluir-se naturalmente que a alturas de onda superiores correspondem também períodos de onda mais elevados (períodos de Inverno) e de forma análoga, a alturas de onda inferiores correspondem

frequências maiores e menores períodos de onda (meses de Verão), de acordo com Coelho e Veloso-Gomes (2003).

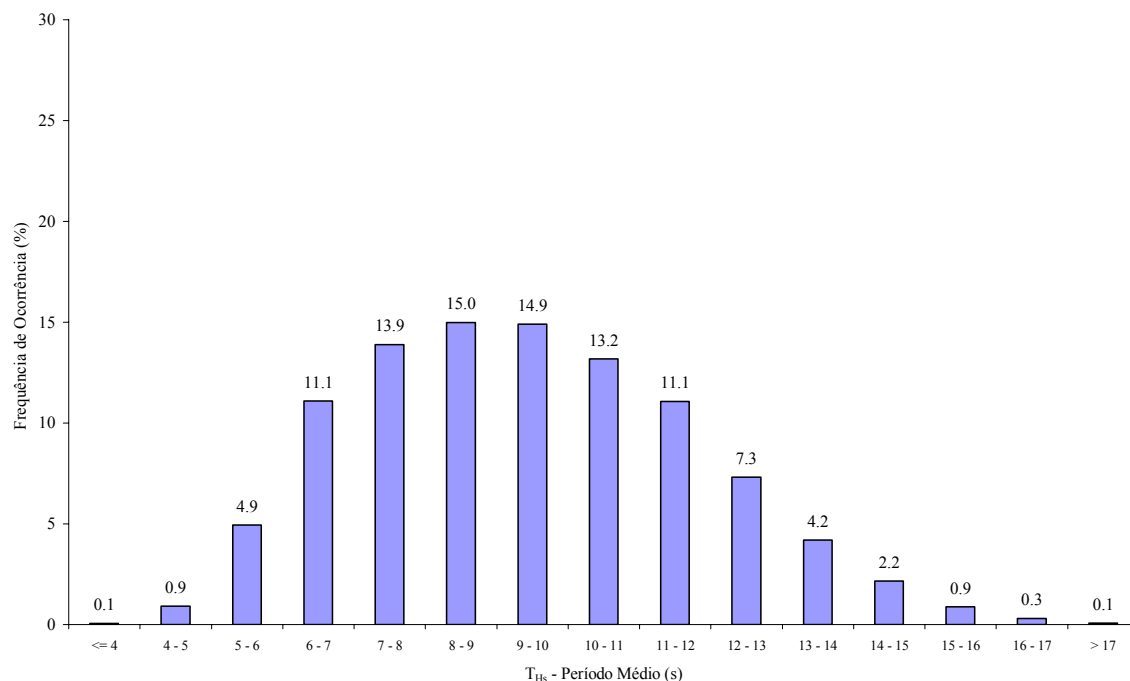


Figura 3.13: Período de onda médio (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

A distribuição dos períodos de onda segue uma lei assimétrica com o centro de gravidade ligeiramente deslocado no sentido dos menores períodos. A percentagem de registos inferiores a 8 s é de 30.9% do total de registos, enquanto as classes de 8 s a 12 s representam 54.1% dos registos e os restantes 15.0% são distribuídos pelas classes mais elevadas. As classes mais representativas são as de 8 s a 9 s, 9 s a 10 s, 7 s a 8 s e 10 s a 11 s, respectivamente com 15.0%, 14.9%, 13.9% e 13.2% dos 25708 registos.

Analisando a distribuição mensal, os máximos registos ocorrem para as classes de 6 s a 7 s e 7 s a 8 s nos meses de Verão (atingindo 27.1% dos registos do mês de Agosto na classe de 7 s a 8 s) e para as classes de 10 s a 11 s e 11 s a 12 s nos meses de Inverno (com 19.8% dos registos no mês de Fevereiro para a classe de 11 s a 12 s).

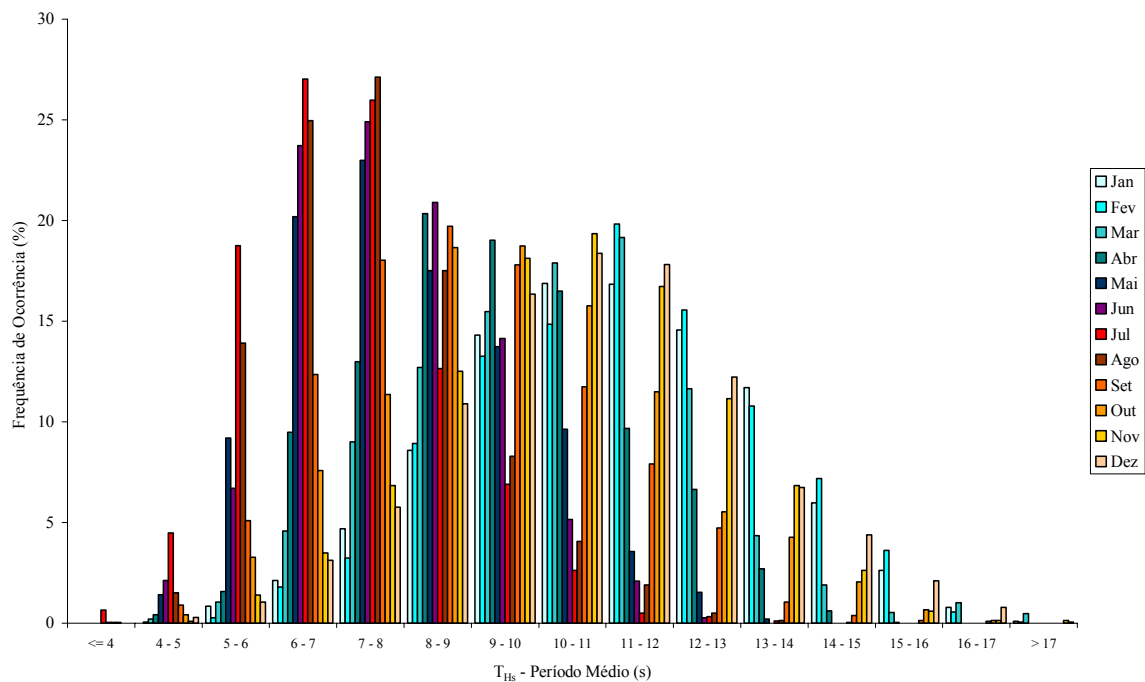


Figura 3.14: Distribuição mensal do período de onda médio (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

Uma rápida comparação entre estes valores e os valores referidos por Veloso-Gomes (1995a), das frequências acumuladas de altura de onda significativa registados na bóia do Cabo Silleiro (Espanha) durante um período de nove anos (1986-1994), mostra alguma convergência de valores. A tabela 3.10 mostra uma comparação entre diversos registos, incluindo os de Coelho e Veloso-Gomes (2003), onde os dados analisados são só até 2001. A diferença desses valores para os indicados em Leixões corresponde apenas à inclusão dos dados referentes a 2002 e 2003. Os dados apresentados por Barata *et al.* (1996) correspondem ao Cabo Mondego no período de 1990 a 1993.

Tabela 3.10: Comparação de percentagem de ocorrências de classes de alturas de onda significativa.

$H_S$ (m)	Leixões	Coelho e Veloso-Gomes (2003)	Barata <i>et al.</i> (1996)	Veloso-Gomes (1995a)
<0.5	0.99	1.16	0.16	1.60
0.5 – 1.5	40.34	41.83	26.42	45.67
1.5 – 2.5	31.72	31.50	35.07	29.62
2.5 – 3.5	13.29	12.86	19.48	14.91
3.5 – 4.5	5.55	5.08	7.49	5.55
>4.5	8.11	7.56	11.38	2.65

Numa análise conjunta da relação entre as alturas de onda significativa e os respectivos períodos de onda, obtém-se uma nuvem de pontos bastante dispersa, como se visualiza na figura 3.15. Devido a esse facto, não é possível obter uma lei de aproximação entre períodos e alturas de onda, com elevada correlação. Tentativas de aproximação linear e logarítmica, pelo método dos mínimos quadrados, aos pontos da figura 3.15, permitiram obter as equações 3.1 e 3.2, onde os coeficientes de correlação obtidos são de apenas 0.47, porque o número de pontos é elevado e a dispersão de valores é significativa. No entanto, as leis apresentadas denunciam a tendência evidente de períodos crescentes para ondas de maior altura.

$$T_{Hs} = 1.21 H_S + 6.92 \quad (3.1)$$

$$T_{Hs} = 2.74 \ln(H_S) + 7.92 \quad (3.2)$$

A figura 3.15 mostra também as aproximações sugeridas por Soulsby (1997), Tucker (1991) e LNEC (1996). Estas, apesar de se aproximarem bastante entre si, estimam períodos de onda bastante inferiores aos verificados na realidade. Assim, as equações 3.3, 3.4 e 3.5 expressam as relações propostas por Soulsby, Tucker e LNEC respectivamente.

$$T_{Hs} = 11 \left( \frac{H_S}{g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$T_{Hs} = \sqrt{\frac{40\pi}{g}} H_s = 3.58 \sqrt{H_s} \quad (3.4)$$

$$T_{Hs} = 1.03 H_s + 5.2 \quad (3.5)$$

Note-se que a expressão apresentada pelo LNEC (1996) corresponde à regressão dos valores médios diários de pares de pontos ( $H_s$ ,  $T_{Hs}$ ).

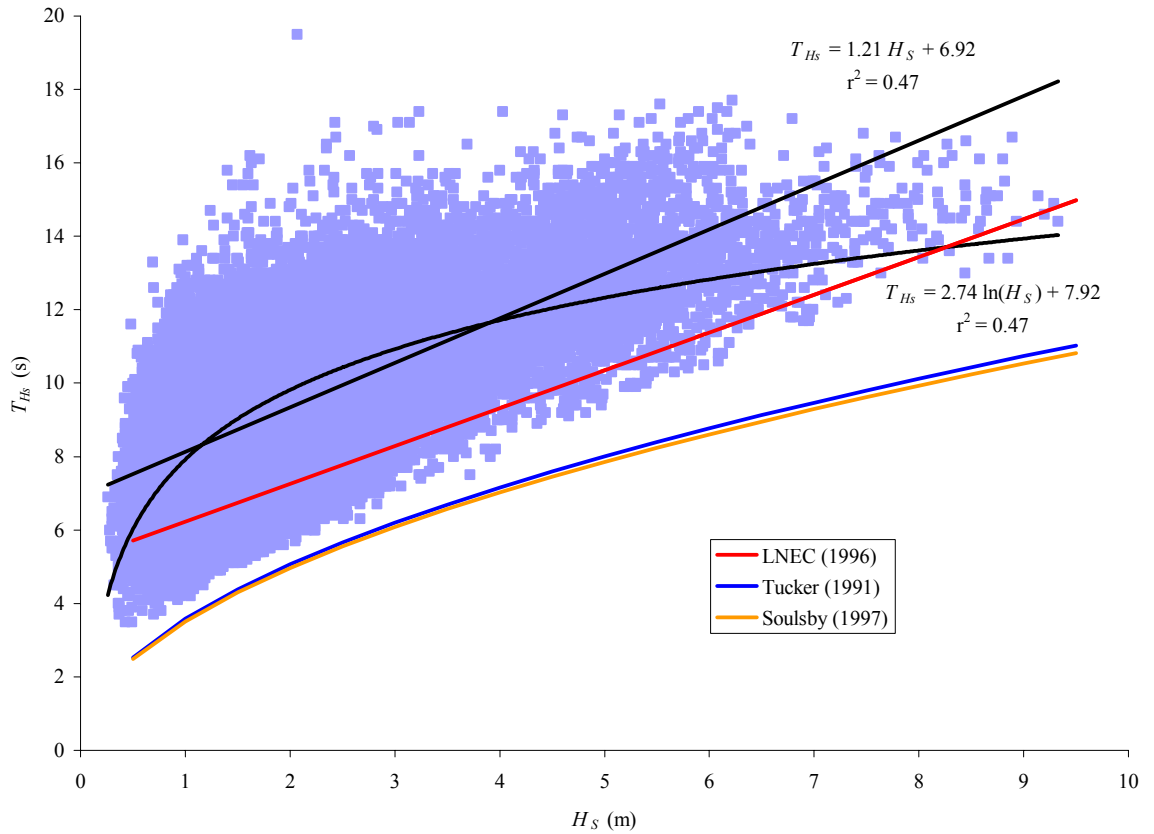


Figura 3.15: Relação entre alturas de onda significativa e respectivos períodos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

A tabela 3.11 mostra o número de registos correspondentes a cada classe de alturas e períodos, realçando-se o facto das maiores ocorrências serem para a classe de ondas entre 0.5 m e 1.5 m, com períodos de 6 s a 7 s, 7 s a 8 s e 8 s a 9 s. Estas classes em conjunto representam quase 25% dos registos totais.

Tabela 3.11: Número de registos para classes de alturas de onda significativa e respectivos períodos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1981 e 2003).

	$H_s$ (m)										$\Sigma$
	$\leq 0.5$	0.5-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5.5	5.5-6.5	6.5-7.5	7.5-8.5	8.5-9.5	
$T_{Hs}$ (s)	$\leq 4$	9	6								15
	4-5	18	219								237
	5-6	63	1008	198							1269
	6-7	69	2006	761	17						2853
	7-8	70	2246	1094	158	3					3571
	8-9	19	1952	1472	368	42					3853
	9-10	5	1454	1549	627	150	45				3830
	10-11		897	1374	727	253	112	23			3386
	11-12	1	423	1047	711	333	262	63	8		2848
	12-13		134	476	471	320	322	135	22	2	1882
	13-14		21	140	240	202	242	148	74	10	1079
	14-15		4	24	71	98	199	80	50	23	557
	15-16		2	12	20	20	96	44	17	12	228
	16-17			5	4	5	17	36	5	6	81
	>17			2	3	1	4	8	1		19
$\Sigma$	254	10372	8154	3417	1427	1299	537	177	53	18	25708

A tabela 3.12 e a tabela 3.13 representam respectivamente a relação entre alturas de onda e respectivos rumos e períodos de onda e respectivos rumos, mas as conclusões que se possam retirar não definem nenhuma tendência principal. Note-se no entanto, que as distribuições para cada rumo são semelhantes e proporcionais ao número de registos em cada classe de rumo. O número de registos com informação simultânea de altura de onda significativa e respectivo período de onda e o rumo médio associado ao período de pico é de 18803.

O rumo de NW com ondas entre 0.5 m e 2.5 m de altura representa perto de 30% dos registos. Ao adicionar-se as mesmas alturas de onda do rumo de WNW, então são ligeiramente ultrapassados os 50% de registos. À medida que se vai avançando para Sul, as classes de altura significativa de onda



mais elevada deixam de ter registos, como se verifica para o quadrante de WSW, com apenas um registo de onda superior a 5.5 m de altura e os quadrantes de SW e SSW com três ondas a ultrapassar os 4.5 m de altura significativa. O quadrante NW só não é o mais representativo nas classes de alturas de onda entre os 3.5 m e os 4.5 m, bem como 5.5 m e 6.5 m. Nestas duas situações, a classe WNW é a mais representada.

Tabela 3.12: Número de registos para classes de alturas de onda significativa e respectivos rumos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

	$D_{Tp}$ (°)									$\Sigma$
	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	
$H_s$ (m)										
≤0.5		11	52	47	10	3	1	1		125
0.5-1.5	6	1123	2909	2238	564	113	70	30	10	7063
1.5-2.5		947	2582	1808	420	120	140	42	4	6063
2.5-3.5		200	1058	946	221	98	59	15		2597
3.5-4.5		28	447	513	81	22	13	3		1107
4.5-5.5		13	562	514	81	3	2	1		1176
5.5-6.5		3	189	240	47	1				480
6.5-7.5			63	55	24					142
7.5-8.5			23	13	4					40
8.5-9.5			9	1						10
$\Sigma$	6	2325	7894	6375	1452	360	285	92	14	18803

O rumo de Noroeste, com períodos de onda entre os 7 s e os 11 s representam as classes mais frequentes, expostas na tabela 3.16, com mais de mil registos cada. Estas classes englobam 23.7% dos registos totais. Adicionando os mesmos períodos de onda do quadrante WNW, que representam 19.0% dos registos, ficam representados mais de 42% dos registos. Tal como para as alturas de onda, os períodos de onda são menores para as ondas provenientes dos quadrantes mais a Sul. O quadrante SSW não apresenta períodos de onda superiores a 10 s e apenas dois registos excedem os 14 s de período de onda em todos os quadrantes desde WSW até S. Apesar do quadrante WNW ser menos frequente que o quadrante NW, para os grandes períodos de onda (superiores a 16 s), o quadrante WNW passa a ser o mais representativo. Este facto sucede também para períodos de

onda entre os 12 s e os 14 s. Só para períodos de onda entre os 4 s e os 5 s é que o quadrante NNW é o mais representado.

Tabela 3.13: Número de registos para classes de períodos de onda e respectivos rumos (dados do Instituto Hidrográfico para a bóia de Leixões, recolhidos entre 1993 e 2003).

		$D_{Tp}$ (°)									$\Sigma$
		N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	
$T_{Hs}$ (s)	$\leq 4$		1	1							2
	4-5	4	47	34	14	9	8	5	6	2	129
	5-6	1	329	336	114	39	13	14	24	4	874
	6-7	1	572	798	418	100	43	53	32	8	2025
	7-8		360	1045	810	205	85	89	20		2614
	8-9		322	1161	902	224	100	79	9		2797
	9-10		325	1152	990	230	62	34	1		2794
	10-11		228	1092	871	247	28	9			2475
	11-12		104	972	825	182	8	2			2093
	12-13		27	577	674	124	7				1409
	13-14		8	357	423	57	4				849
	14-15		2	239	193	16	2				452
	15-16			101	88	11					200
16-17			27	39	8					74	
$>17$			2	14						16	
$\Sigma$		6	2325	7894	6375	1452	360	285	92	14	18803

### 3.1.5 Relação Entre Ventos e Agitação Marítima

Para verificar a relação entre os registos de vento e o clima de agitação ao largo, tentou estabelecer-se uma comparação de determinados valores de agitação com todos os registos de vento existentes no dia de ocorrência dessa agitação (4 valores por dia). Assim, para análise da relação entre quadrantes de proveniência das ondas e ventos verifica-se o exposto na tabela 3.14.

Tabela 3.14: Relação entre os rumos do clima de agitação em Leixões e os rumos de vento ao largo de Aveiro (dados do vento do Instituto de Meteorologia e dados de agitação na bóia de Leixões, do Instituto Hidrográfico, no período de Julho de 1993 a Agosto de 2002).

		Dias	v (m/s)	Vento (% de ocorrências por quadrante)							
				N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Ondas	NNW	649	4.7	39.0	15.7	5.7	2.9	2.9	4.9	6.3	22.7
	NW	1492	4.4	27.4	11.9	6.2	4.6	6.5	10.2	10.1	23.0
	WNW	1215	4.3	17.8	8.6	7.3	7.2	10.9	15.2	12.1	21.0
	W	434	4.5	12.2	7.0	8.2	10.9	15.3	19.7	11.4	15.3
	WSW	129	5.7	4.8	4.3	5.6	12.2	26.7	26.9	10.5	8.9
	SW	109	6.5	1.8	2.3	8.7	17.0	41.1	18.6	6.4	4.1
	SSW	46	7.0	1.1	0.0	2.7	19.6	39.1	26.1	7.6	3.8

No período em análise (Julho de 1993 a Agosto de 2002), o quadrante de agitação com registos num maior número de dias é o quadrante NW, em que se verificou pelo menos um registo em 1492 dias do período analisado. Nos referidos dias, os ventos sopram essencialmente de N e NW, representando 50.4% das proveniências. A velocidade média do vento nesses dias é de 4.4 m/s.

É interessante confirmar a elevada relação entre a direcção dos ventos e a direcção da agitação, já que se verifica que a agitação proveniente de cada quadrante coincide com elevadas percentagens de ventos a soprar desses mesmos quadrantes. Ondas de NNW correspondem a ventos de N e NW em 61.7% dos casos e ondas de SSW correspondem a ventos de S e SW em 65.2% dos casos. Os ventos de Norte têm importância decrescente e os ventos de Sul uma importância crescente, à medida que a ondulação tem proveniência de rumos desde Norte até Sul. Os ventos de Oeste nunca apresentam uma importância elevada nas proveniências das ondas, apesar dos valores mais altos serem naturalmente para ondas dos quadrantes NW a WSW. Os ventos de E apresentam pouca relevância em todos os rumos de ondas.

Ainda na tabela 3.14, as velocidades médias dos ventos são superiores para os dias de agitação proveniente dos rumos de Sul. Os rumos de agitação de Norte a Oeste apresentam valores semelhantes de velocidades médias de vento. A tabela 3.15 mostra cinco diferentes escalões de alturas de ondulação. Para cada uma das classes foi calculado o valor médio da velocidade do vento nos dias em que as alturas de onda foram registadas. Como seria de esperar, a velocidade média do

vento vai aumentando com o aumento das classes de altura de onda. Os elementos de vento, apresentados no ponto anterior do trabalho, possibilitaram a constatação de velocidades de vento inferiores às adoptadas em Coelho e Veloso-Gomes (2003).

Tabela 3.15: Relação entre classes de alturas de onda em Leixões e ventos ao largo de Aveiro (dados do vento do Instituto de Meteorologia e dados de agitação na bóia de Leixões, do Instituto Hidrográfico, no período de Outubro de 1981 a Agosto de 2002).

Classe de $H_s$ (m)	$v$ (m/s)	Dias
$\leq 1$	3.6	848
1 – 2	4.2	1908
2 – 3	5.0	1253
3 – 6	6.0	633
$> 6$	8.4	42

Foram analisados os ventos relacionados com os períodos de ondulação típicos de temporal persistente. Dos 50 temporais de que se possui registos, apenas 41 coincidem com registos de vento, sendo os restantes nove posteriores a Agosto de 2002. Foram avaliados os registos de vento no período compreendido entre o início e o final dos registos de ondulação em temporal. Assim, 240 valores de vento foram estudados, correspondendo a uma velocidade média de 7.5 m/s. A velocidade média do vento registado durante o período de temporal ultrapassa os 10 m/s em cinco situações. Este facto realça a relação entre os ventos fortes e as ondas de maior altura significativa.

Em termos de direcção do vento, também foi efectuada uma análise detalhada, permitindo elaborar a rosa de ventos que se apresenta na figura 3.16. Constata-se que em situação de temporal, a proveniência de ventos é essencialmente de Oeste. A figura 3.16 permite visualizar que cada um dos rumos de SW e W passam a representar mais de 20% de ocorrências que originam temporal, somando em conjunto 51.7% dos registos. Os rumos de E, NE e SE deixam de ter significado, perfazendo em conjunto apenas 5.5% dos valores, quando em ano médio representam 25.2% das frequências.

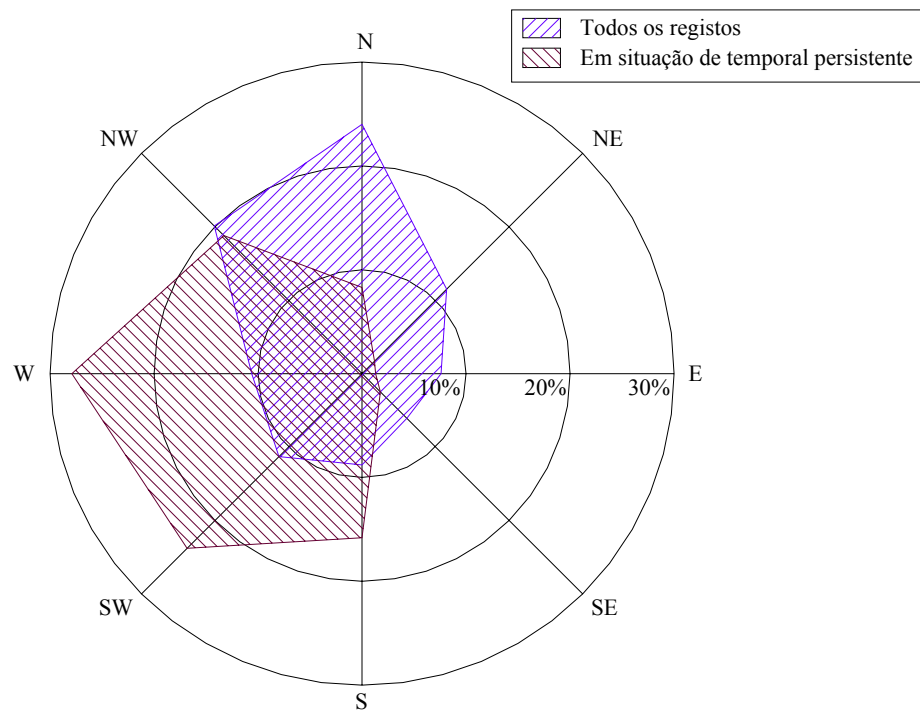


Figura 3.16: Comparação entre a proveniência de ventos média anual (baseado em todos os dados do Instituto de Meteorologia, de Janeiro de 1980 a Agosto de 2002) e a que origina situações de alturas de ondas elevadas, com persistência de pelo menos 8 h.

### 3.1.6 Fenómenos de Alteração da Agitação na Propagação em Direcção à Costa

Sem pretender descrever em detalhe a propagação da agitação marítima desde o largo até à costa, interessa no entanto referir a existência de fenómenos relevantes e quais as suas principais implicações. A agitação local difere da que se verifica ao largo, devido a diversos fenómenos que ocorrem ao longo da propagação com deformação das ondas até à costa. Enquanto as características ao largo se podem assumir aproximadamente idênticas numa larga extensão, as características junto à costa são próprias de cada local, já que são influenciadas pelos fundos e pelo “recorte” da costa. Assim, neste ponto do trabalho são enumerados de uma forma simples e sumária os principais fenómenos que ocorrem nessa propagação. Estes fenómenos ocorrem por interacção entre as ondas e os fundos e fronteiras sólidas (praias, falésias, estruturas portuárias, etc.).

Os principais fenómenos aqui referidos são a refacção, a difracção, o empolamento, a reflexão, a rebentação, o espriamento e o refluxo das ondas. Alguns destes aspectos são analisados com maior detalhe durante a aplicação de modelos, no capítulo 6. A figura 3.17 representa esquematicamente e de uma forma muito simplificada, alguns dos fenómenos que de seguida se expõem.

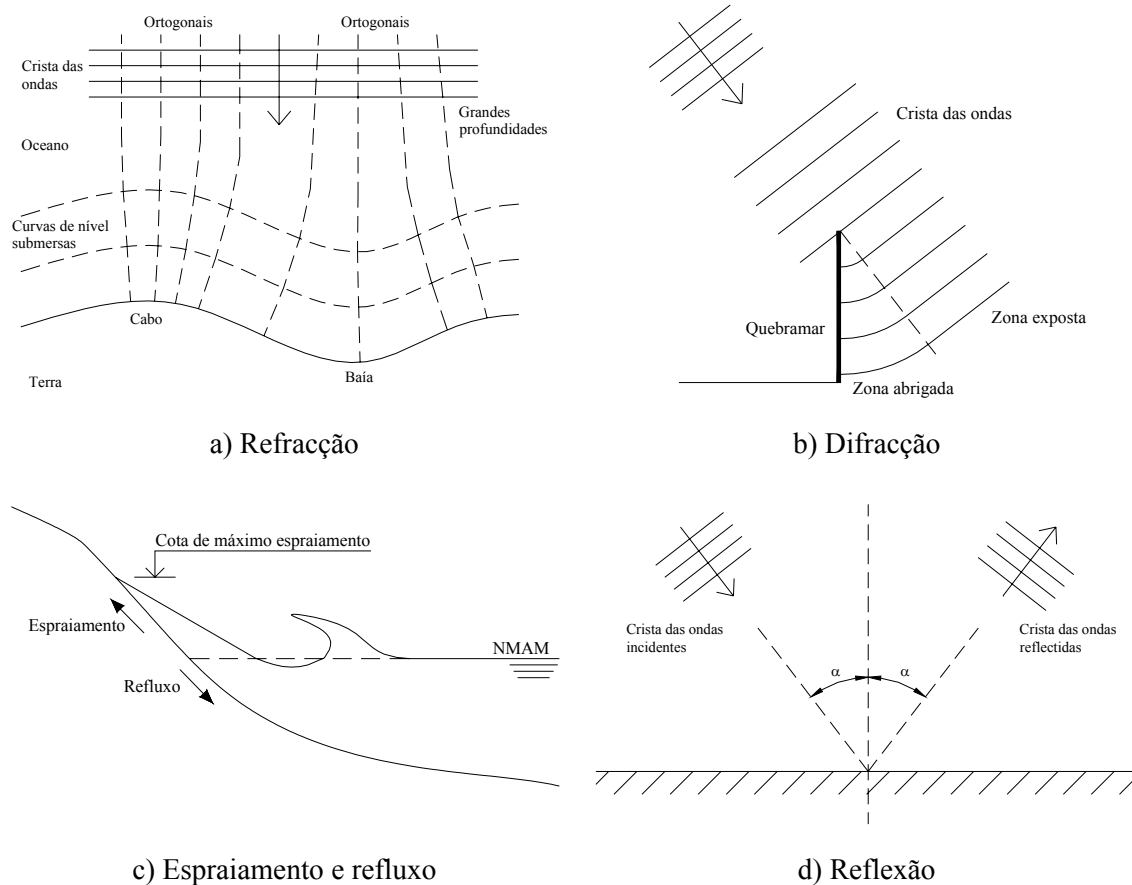


Figura 3.17: Representação esquemática de fenómenos de alteração da propagação da agitação.

### Refracção

O fenómeno designado por refracção ocorre quando a linha de crista das ondas forma um determinado ângulo com as curvas de nível do fundo do mar (batimétricas). Nestes casos, as ondas sofrem uma deformação, tendendo a alinhar-se com as curvas de nível do fundo. Identificando as linhas perpendiculares às cristas das ondas como ortogonais, o esquema da figura 3.17-a permite visualizar as zonas de concentração de ortogonais (na proximidade dos cabos) que correspondem também a zonas de concentração de energia, enquanto nas baías ocorre a divergência de ortogonais e a rarefacção da energia das ondas. O fenómeno da refracção pode afectar a batimetria dos fundos móveis, bem como influenciar as acções a considerar em projecto de quebra-mares e de obras de acostagem (Veloso-Gomes, 1995b).

### Difracção

O fenómeno da difracção ocorre quando a onda, na sua propagação para a costa, encontra um obstáculo, contornando-o e penetrando na zona protegida. O caso de uma baía protegida por um promontório abrupto ou de um porto protegido por um quebramar (figura 3.17-b) são exemplos comuns de zonas abrigadas ou parcialmente abrigadas. A formação de tômbolos por deposição de sedimentos na sombra de quebramares destacados é também consequência do fenómeno de difracção. De facto, neste processo está associada uma transferência lateral de energia ao longo da crista da onda, no sentido da zona exposta directamente à acção da onda para a zona abrigada. Assim, estas zonas não permanecem calmas, mas as ondas que aí penetram, sofrem alteração das suas características (Abecasis *et al.*, 1957). O estudo do problema da difracção é complexo e depende do ângulo de incidência das ondas em relação ao obstáculo.

### Empolamento

Quando uma onda se aproxima de uma praia com uma incidência perpendicular, o seu comprimento de onda vai diminuindo como consequência da diminuição da velocidade de propagação, ao mesmo tempo que a sua altura vai aumentando (Abecasis *et al.*, 1957). Este fenómeno deve-se essencialmente à diminuição das profundidades e é designado de empolamento.

### Rebentação

Quando as ondas se propagam sobre fundos de profundidade decrescente, o seu comprimento vai diminuindo, ao mesmo tempo que a sua altura aumenta. Quando a profundidade desce além de um determinado valor, a onda torna-se instável e rebenta. Na expressão 3.6,  $d_b$  representa uma aproximação à profundidade da rebentação. Este parâmetro, entre outros, é dependente da inclinação dos fundos e do comprimento de onda, pelo que é alvo de numerosos estudos, no entanto, esta aproximação é utilizada com frequência em aplicações da engenharia costeira.

$$d_b = \frac{H_b}{0.78} \quad (3.6)$$

A observação mostra também que a rebentação pode dar-se segundo tipos fundamentais muito diferentes, tendo grande influência nalguns dos fenómenos em estudo. Assim, é habitual considerar e interessa distinguir os casos típicos de rebentação progressiva, rebentação mergulhante e

rebentação oscilatória ou oscilante. Estes diferentes tipos de rebentação têm bastante importância, por exemplo na distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal.

O tipo de rebentação depende da inclinação da praia ( $\beta$ ) e da declividade da onda. Praias suaves são propícias à rebentação progressiva, enquanto que praias declivosas favorecem a rebentação mergulhante. A declividade da onda intervém no sentido de que fortes declividades favorecem a rebentação progressiva, enquanto que ondas de fraca declividade propiciam a rebentação em mergulho (Castanho, 1966). O parâmetro de Battjes ( $\xi_0$ ), também utilizado por Iribarren, permite estabelecer as gamas de ocorrência dos diversos tipos de rebentação. A definição deste parâmetro segue a expressão 3.7 e as gamas de ocorrência estão de acordo com a tabela seguinte, admitindo inclinações uniformes dos fundos e as características de onda ao largo (altura de onda e comprimento de onda).

$$\xi_0 = \tan \beta \left( \frac{H_0}{L_0} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Tabela 3.16: Critério de classificação do tipo de rebentação das ondas.

Tipo de rebentação da onda	Gama de ocorrências
Progressiva	$\xi_0 < 0.5$
Mergulhante	$0.5 < \xi_0 < 3.3$
Oscilatória	$\xi_0 > 3.3$

No tipo de rebentação progressiva, a onda empola, mantendo praticamente a sua forma simétrica até que uma pequena emulsão de ar-água aparece na crista. Este início de rebentação progride até cobrir em geral toda a frente da onda, mantendo a zona turbulenta mais ao menos junto à superfície. Enquanto se processa o fenómeno da rebentação, a onda continua a propagar-se, mantendo em grande parte o seu perfil simétrico.

A rebentação mergulhante é um processo muito mais rápido e violento de dissipação de energia. Com a diminuição de profundidade, a frente da onda encurta e torna-se cada vez mais inclinada, enquanto que o tardo se alonga, tornando-se cada vez mais suave. Em dado momento, a frente torna-se vertical e a parte superior da crista galga o corpo inferior da onda, caindo em voluta, ou mergulho.



Para taludes muito íngremes pode ocorrer o tipo de rebentação oscilatória. A fase inicial da rebentação é semelhante à rebentação mergulhante, mas há então um adiantamento da zona inferior da onda que leva ao colapso da crista. Os fenómenos de reflexão têm bastante importância neste tipo de rebentação. Por vezes, o colapso da crista não é notório, havendo apenas um movimento de vai e vem (Veloso-Gomes, 1995b). Existem muitas situações intermédias de rebentação que tornam difícil o seu enquadramento numa das classes referidas.

#### Espraçamento e refluxo

O espraçamento é a fase de propagação após a rebentação da onda. A quantificação do espraçamento é importante na determinação da parte activa de um perfil de praia e também no projecto de obras costeiras. Se a cota de máximo espraçamento exceder a cota de coroamento de estruturas (quebramares, enrocamentos, etc.), ocorre o galgamento das mesmas. O fenómeno de espraçamento é dependente da reflexão das ondas e dos efeitos tridimensionais da batimetria, bem como da porosidade, rugosidade, permeabilidade e do nível freático. O comportamento em estruturas de defesa é também distinto do comportamento numa praia (Smith, 2003). O espraçamento é entendido como o pico máximo da elevação da água, medido na vertical em relação ao nível de repouso. Os sucessivos fenómenos de espraçamento são intercalados por fenómenos de refluxo, correspondendo à cota mais baixa atingida na interacção entre a onda marítima e a praia ou estrutura costeira (figura 3.17-c).

O espraçamento pode ser abordado considerando duas componentes: uma relativa à sobrelevação do nível do mar devido à acção das ondas (*setup*) e a outra quando a onda se estende na praia (*swash*). São diversas as propostas de quantificação do espraçamento, apresentando-se de seguida três alternativas. A expressão 3.8 foi sugerida por Mase, em 1989, com base em dados de laboratório, para praias impermeáveis, com inclinações entre 1/5 e 1/30 (Smith, 2003). Em trabalho apresentado por Holman (1986), são indicadas as expressões 3.9 e 3.10. Estas resultam da combinação estatística de dados medidos em praias de características intermédias a reflectivas, de Oregon e Duck, nos Estados Unidos da América. A expressão 3.10 tem pior aproximação aos dados de base, mas representa melhor as praias do tipo dissipativo (Ruggiero *et al.*, 1997). As diferenças entre as propostas têm mais significado para pequenas inclinações de praia e maiores alturas de onda, ultrapassando mesmo os 40% de variação nos resultados.

$$R_{u2\%} = 1.86 H_0 \xi_0^{0.71} \quad (3.8)$$

$$R_{u2\%} = 0.75 \tan \beta (H_s L_0)^{\frac{1}{2}} + 0.22 H_s \quad (3.9)$$

$$R_{u2\%} = 0.27 (\tan \beta H_0 L_0)^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

### Reflexão

A reflexão das ondas de superfície em meio fluido obedece às leis gerais de reflexão de outros tipos de ondas noutros meios contínuos. Assim, o ângulo de reflexão de uma onda deverá ser igual ao ângulo de incidência (figura 3.17-d). As ondas reflectidas podem interferir com as ondas incidentes, gerando um esquema bidimensional ou tridimensional de interferência. No caso de uma incidência normal a um obstáculo vertical resultará numa reflexão total, com a formação de “clapotis” ou ondas estacionárias. Se as ondas incidirem num plano inclinado, a reflexão da onda será parcial. As características do obstáculo reflector (por exemplo, a inclinação e a rugosidade) vão influenciar o nível de dissipação de energia na reflexão.

#### **3.1.6.1. Modelos de propagação da agitação marítima**

A referência relativa a um Concurso Público Internacional para a barra do Douro, que envolveu sete consórcios internacionais e que reuniu o que entenderam ser a melhor tecnologia internacional em termos de simulação dos fenómenos que ocorrem durante a propagação das ondas, permite constatar o actual estado de conhecimento dos fenómenos agora descritos. Este relatório refere diferentes técnicas de modelação e evidencia algumas das lacunas existentes. Na análise apresentada, os modelos foram inseridos em seis categorias distintas. A descrição analisa genericamente os diferentes tipos de modelos e os quadros correspondentes resumem os principais modelos comerciais que simulam os fenómenos que ocorrem durante a propagação das ondas (adaptado de Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Os modelos de refração espectral procedem à transposição do espectro de energia da agitação do largo para a costa e baseiam-se na equação de conservação da acção da onda. Neste tipo de modelos encontra-se geralmente incluída a acção do empolamento, a refração do fundo, a refração devida às correntes (interacção entre ondas e correntes) e a dissipação de energia por atrito no fundo e por rebentação. A maior parte destes modelos inclui também geração por acção do

vento. Devido à não inclusão dos efeitos dos fenómenos de difracção e reflexão, este tipo de modelos não deve ser aplicado em zonas próximas da costa (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos de refracção espectral	
COWADIS	Desenvolvido pela EDF, utiliza um esquema numérico de elementos finitos e não inclui qualquer interacção onda-onda.
MIKE21-NSW	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas e também não inclui qualquer interacção onda-onda.
SWAN	Desenvolvido pela TUDelft, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de primeira ordem. Inclui as interacções onda-onda em água profunda e em água pouco profunda. O esquema numérico é estável mas demasiado dissipativo, não devendo ser utilizado para distâncias de propagação superiores a 25 km.
STWAVE	Desenvolvido pelo USACE, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas. Apesar de incluir as interacções onda-onda em água profunda e pouco profunda, não inclui dissipação de energia por atrito no fundo.

Os modelos de refracção-difracção incluem os efeitos combinados da refracção e da difracção, dissipação de energia por atrito no fundo e por rebentação. O número de modelos comerciais que se apresentam nesta categoria é de cinco (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos de refracção-difracção	
ARTEMIS	Desenvolvido pelo EDF, utiliza um esquema numérico de elementos finitos. Inclui a reflexão parcial ou total da onda e a dispersão de frequência, recorrendo à sobreposição linear.
MIKE21-PMS	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas. É assumida uma direcção predominante para a propagação da onda e a difracção e a reflexão são apenas incluídas na direcção transversal à direcção de propagação.
RD-2DH	Desenvolvido pela Europrincipia, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas. É assumida uma direcção predominante para a propagação da onda e a difracção e a reflexão são apenas incluídas na direcção transversal à direcção de propagação. Inclui a dispersão de frequência, recorrendo à sobreposição linear.

REFDIF v2.5	Desenvolvido pela Hidromod, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas. É assumida uma direcção predominante para a propagação da onda e a difracção e a reflexão são apenas incluídas na direcção transversal à direcção de propagação. Inclui a interacção onda-corrente e alguma não linearidade.
MEGA	Módulo ONDAS, desenvolvido pela Hidroprojecto, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas. É assumida uma direcção predominante para a propagação da onda e a difracção e a reflexão são apenas incluídas na direcção transversal à direcção de propagação.

Os modelos tipo raio de onda estudam a propagação de um raio de onda e a variação das características da mesma por efeito separado da refacção nos fundos, da difracção e da reflexão. Os efeitos são depois adicionados por sobreposição linear. Uma distribuição horizontal da altura de onda é obtida por interpolação entre raios de onda (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos tipo raio de onda	
PORTRAY	Desenvolvido pelo HR Wallinford, é baseado na equação de Snell e foi concebido para ser utilizado em áreas portuárias.

Os modelos de ondas não lineares dispersivas baseiam-se em equações do tipo de Boussinesq. Resultam da integração analítica da equação da conservação da quantidade de movimento segundo a direcção vertical. Nestes modelos encontram-se incluídos os efeitos conjuntos do empolamento, da refacção no fundo, da difracção, da interacção não linear (não linearidade fraca), da dispersão de frequências das ondas e da dissipação de energia por atrito no fundo. Alguns destes modelos também incluem a rebentação e a interacção onda-corrente (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos de ondas não lineares dispersivas	
MIKE21-BW	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um modelo numérico de diferenças finitas com precisão de segunda ordem. Não inclui rebentação nem interacção onda-corrente.
MOHID	Módulo Boussinesq, desenvolvido pelo IST, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas com precisão de segunda ordem. Inclui rebentação, mas não inclui interacção onda-corrente. Apresenta excessiva dissipação numérica para ondas de grande declividade.

WAVES-2DH	Desenvolvido pela Europricipia, tem por base o modelo de Boussinesq, devendo a sua aplicação limitar-se a águas pouco profundas. Inclui a rebentação, atrito no fundo e viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta dá origem a excessiva dissipação numérica.
-----------	---

Baseados nas equações de Saint-Venant, os modelos bidimensionais de correntes e marés resultam da integração analítica da equação de conservação da quantidade de movimento na direcção vertical admitindo uma distribuição hidrostática de pressões e uma distribuição uniforme de velocidades na vertical. Incluem variações de pressão atmosférica, o efeito do vento e a dissipação de energia por atrito no fundo, sendo o tipo de modelo utilizado habitualmente para simulação da maré e das correntes por elas geradas em zonas costeiras. Os modelos unidimensionais de correntes e marés resultam de restrições dos modelos bidimensionais e destinam-se essencialmente ao estudo de escoamentos em rios e canais. Este tipo de modelos não inclui o efeito das correntes geradas pelas ondas, mas está incluída a dissipação de energia por atrito no fundo (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos bidimensionais de correntes e marés	
MEGA	Módulo Maré-2D, desenvolvido pela Hidroprojecto, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo.
MIKE21-HD	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo.
MOHID	Módulo Saint-Venant, desenvolvido pelo IST, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo.
TELEMAC-2D	Desenvolvido pela EDF, utiliza um esquema numérico de elementos finitos.

Modelos unidimensionais de correntes e marés	
MIKE11-HD	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo.
MOHID	Módulo Fluvial, desenvolvido pelo IST, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas de segunda ordem no espaço e no tempo.

O modelo numérico que tem sido utilizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em diversos estudos de agitação (Avilez-Valente e Veloso-Gomes, 1992) é baseado num esquema de discretização por elementos finitos, a duas dimensões horizontais, da equação de fundos suaves,

com um termo de dissipação de energia. A equação de fundos suaves, desenvolvida por Berkhoff (1972), descreve a propagação de ondas monocromáticas sujeitas ao efeito combinado da refacção, da difracção e da reflexão. Booij (1981) introduziu neste modelo um termo de dissipação de energia. A dissipação de energia pode resultar do processo de rebentação da onda e/ou do atrito no fundo.

Como se verifica, são muitas as possibilidades actuais de simular os diversos fenómenos que ocorrem durante a propagação das ondas. Qualquer dos modelos apresenta limitações, que terão maior ou menor influência nos resultados em função do tipo de modelação pretendida.

### **3.2 Acções Antropogénicas**

O presente ponto do trabalho pretende sumariar algumas das principais acções humanas com impacte sobre a evolução fisiográfica das faixas costeiras, separando a referência a acções que indirectamente vão influenciar a morfodinâmica das zonas costeiras e as acções de intervenção para directamente condicionar a forma de evolução da zona costeira.

#### **3.2.1 Actividades Potencialmente Geradoras da Evolução da Linha de Costa**

As actividades, usos e ocupações que se referem de seguida, não têm como objectivo o controlo da posição da linha de costa, mas por variadas razões alteram as características fisiográficas da zona costeira. Podem referir-se de forma sucinta os aspectos relacionados com os aproveitamentos hidráulicos e o enfraquecimento das fontes aluvionares, com redução do caudal sólido transportado para o mar. A artificialização das bacias hidrográficas e das margens dos rios e a canalização dos cursos de água também têm consequências óbvias na redução de sedimentos fornecidos ao mar. Os quebra-mares e canais de navegação, bem como as dragagens de primeiro estabelecimento e de manutenção, interrompem o transporte sólido litoral e criam défice sedimentar. A destruição de cordões dunares e a extracção de areias facilitam a ocorrência de galgamentos e originam também défices sedimentares. A urbanização das zonas costeiras, através da implantação de edificações em locais com interacções fisiográficas, é o último ponto aqui referido como tendo impactes na evolução costeira. Por outro lado há que salientar que zonas costeiras que no passado estiveram submetidas a intensas evoluções dinâmicas são actualmente ocupadas com infra-estruturas, edificações e actividades que estão em conflito com a continuidade dessas evoluções.

### **3.2.1.1 Aproveitamentos hidráulicos**

A construção de barragens, com a criação de albufeiras é encarada como uma forma de trazer mais valias para uma Região ou para um País através: da produção de energia hídrica, da criação de condições para a prática de desportos náuticos com consequente fomento do turismo, constituição de reservas de água para uso agrícola e de abastecimento às populações, controlo de cheias, criação de condições para a navegabilidade comercial, entre outras.

O aproveitamento energético dos rios, através da construção de barragens constitui actualmente uma componente indispensável do fornecimento de energia renovável à sociedade. Mas os aproveitamentos hidráulicos estão a reduzir drasticamente o caudal sólido transportado para o mar, agravando as erosões na costa (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997). Este é um problema que assume proporções à escala mundial.

Os aproveitamentos hidráulicos conduziram no século XX, e em particular na segunda metade desse século, ao enfraquecimento das fontes aluvionares que atingiam a orla costeira. A retenção dos sedimentos nas barragens (em alguns casos) e de “sedimentação” nas albufeiras (a montante e a jusante de cada albufeira), aliada a uma redução da capacidade de transporte sedimentar dos rios por atenuação dos campos de velocidades tem impactes negativos nas quantidades de sedimentos que atingem os estuários, agravando a erosão da costa.

Por outro lado são muito significativas as alterações que têm ocorrido a nível de bacias hidrográficas com impactes potenciais na redução da capacidade erosiva dos solos e por conseguinte dos montantes de sedimentos transportados pelos sistemas hídricos: controlo da erosão nos solos onde se pratica a agricultura, regularização e canalização de margens, protecção de taludes, revestimento de solos em zonas urbanas e em vias de comunicação, actividades de florestação.

A uma escala geológica, a subida generalizada do nível das águas do mar vai, por sua vez, dificultando o transporte para o mar dos sedimentos que atingem os estuários, provocando progressivos assoreamentos dos troços inferiores desses estuários. Como muitas das actividades portuárias e de navegação estão localizadas nos estuários, as necessidades de dragagens aumentam, com retirada de volumes sedimentares dos mesmos.

A quantificação do transporte sedimentar associado aos rios que atinge as zonas costeiras é de importância crucial para a compreensão dos fenómenos de erosão (ou de migração das praias para o interior) bem como para a previsão da evolução desses fenómenos ao longo das próximas décadas. Essa quantificação é difícil pelo que será prudente apontar ordens de grandeza dos valores em jogo.

Em relação à situação em Portugal, apresentam-se alguns dados que ilustram as alterações em curso. A tabela 3.17 indica o número de barragens localizadas em território nacional com albufeiras de capacidade superior a dez milhões de metros cúbicos bem como o período da sua construção. Mais de dois terços da bacia do Douro está localizada em Espanha e aí existem grandes aproveitamentos hidráulicos.

Tabela 3.17: Número de barragens com albufeiras de capacidade superior a dez milhões de metros cúbicos, localizadas em território nacional (baseado em dados do INAG, 2002).

Bacias hidrográficas	Ano de entrada em funcionamento			
	Até 1940	1941 a 1960	1961 a 1980	Desde 1981
Minho				
Lima				2
Cávado		4	2	
Ave	1			
Douro	1	1	6	4
Vouga				
Mondego		1		3

Em termos de áreas e de caudais, a importância relativa das bacias dos rios Minho, Lima, Cávado e Ave na produção e transporte de sedimentos é pequena, quando comparada com a do rio Douro.

Após a análise dos volumes de dragagens à entrada do porto de Leixões no período de 1953 a 1978, foi estimado que ao porto de Leixões e proveniente da costa a Norte chegaria um valor médio na ordem dos 150000 m<sup>3</sup>/ano a 180000 m<sup>3</sup>/ano (HP, 1981a). A bacia hidrográfica do Douro tem uma dimensão enorme, e o seu impacto na costa a Sul do porto de Leixões é muito importante. A área somada das quatro bacias a Norte de Leixões representa apenas cerca de 25% da área da bacia do Douro. Se for feito um estudo das áreas com capacidade de produção de areias essa percentagem desce para cerca de 16.5%.



Bettencourt (1997) refere que o fornecimento de sedimentos às áreas litorais diminuiu drasticamente nos últimos 30 anos, indicando os valores de 1.5 a 2 milhões  $\text{m}^3/\text{ano}$  de sedimentos transportados pelo Douro até à foz, em regime natural e que esse valor é actualmente inferior a 250000  $\text{m}^3/\text{ano}$ . A retenção de sedimentos nas barragens é uma explicação que tem sido muito utilizada. Efectivamente, atentando nos dados de Oliveira (1990), apercebe-se que o rio Douro perdeu cerca de 86% da sua capacidade de alimentação do litoral devido à construção das barragens. Esse processo levou a uma diminuição muito significativa da bacia que efectivamente drena para o mar através do Douro. Dada a proximidade entre a barragem de Crestuma e a Foz do Douro, o Douro foi mesmo o rio que mais capacidade de transporte de sedimentos terá perdido.

A HP (1981a) tentou caracterizar as fontes aluvionares da ria de Aveiro, considerando evidente um decréscimo regular no tempo desta fonte aluvionar. No período de 1952 a 1960 a expulsão natural de material aluvionar com característica de material de praia (cerca de 50% da expulsão total) seria de 360000  $\text{m}^3/\text{ano}$ , reduzindo para 310000  $\text{m}^3/\text{ano}$  no período de 1961 a 1963. No intervalo de 1964 a 1970 os valores obtidos rondariam os 220000  $\text{m}^3/\text{ano}$  e de 1971 a 1977 terão descido para os 165000  $\text{m}^3/\text{ano}$ .

A bacia do Mondego tem um impacte grande no volume de água retido, essencialmente desde a década de 80. Importantes obras de regularização da bacia hidrográfica do Mondego, executadas nas décadas de 70 e 80 criaram um sistema de barragens com grande retenção de caudal sólido. Resultantes destas intervenções foram as grandes e rápidas modificações da morfologia do estuário e da faixa litoral adjacente e uma alteração da dinâmica sedimentar estuarina e fluvial (Cunha e Dinis, 1998).

Com a indicação de alguns valores referentes às principais bacias hidrográficas do Noroeste português, pretende-se explicitar o evidente decréscimo de sedimentos a atingir a costa, mas também a dificuldade da sua quantificação efectiva.

### **3.2.1.2 Quebramares e canais de navegação**

Os transportes marítimos são um dos vectores mais importantes nas trocas comerciais internacionais. Possibilitam mais de 80% dessas trocas comerciais. Os quebramares e os canais de acesso aos portos comerciais, de pesca e de recreio são essenciais à segurança e à operacionalidade da navegação marítima e fluvio-marítima. No entanto, introduzem efeitos de barreira ao transporte

sólido litoral, efeitos que subsistirão e que poderão intensificar-se pelo aumento do número e extensão dessas estruturas (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997).

A caracterização dos portos comerciais, de pesca e de recreio (com respectivos quebra-mares e canais de acesso) é por isso importante. As dragagens efectuadas pelas autoridades portuárias para manterem a navegabilidade dos seus canais, representam também um volume significativo de sedimentos retirados ao processo natural de transporte litoral. A quantificação de volumes e das reais consequências destas obras portuárias é naturalmente difícil, pelo que se faz neste ponto do texto apenas uma pequena abordagem de alguns valores. Em geral, a descrição das obras nos portos demonstra que estas intervenções são realizadas desde longa data.

Ao longo da costa Noroeste portuguesa existem importantes infra-estruturas portuárias com impactes no transporte sedimentar. Segue uma breve descrição, com indicação da cronologia das principais intervenções (IPTM, 2003).

- Vila Praia de Âncora – dois quebra-mares, com construção das infra-estruturas marítimas do portinho e novos molhes de protecção, rampas de varadouro, ponte-cais, etc., durante os anos de 2002 e 2003;
- Viana do Castelo – localizado no estuário do Lima, caracterizado por dois quebra-mares extensos, canal de navegação e docas. As obras do porto e barra decorreram entre 1888 e 1902. Desde essa data, frequentes melhoramentos foram efectuados, com aprofundamento de canais e docas e a construção do molhe do Cabedelo (margem Sul) em 1932. A adjudicação da construção dos molhes de protecção, desvio da foz do rio Lima, retenção marginal Norte e porto comercial na margem Sul do rio Lima aconteceu em 1976;
- Póvoa de Varzim – dois quebra-mares. A construção do quebramar Norte decorreu entre 1929 e 1940, enquanto o quebramar Sul foi construído entre 1940 e 1948. Em 1995 decorreram obras de reforço do molhe Norte;
- Vila do Conde – localizado no estuário do Ave, com dois pequenos quebra-mares. Em 1935 iniciou-se o melhoramento do porto e barra de Vila do Conde (molhes, muros cais, rampas, etc.). Em 1960 decorreu a construção do molhe de Nossa Senhora da Guia (molhe Norte), reforçado em 1995;
- Leixões – consiste em dois extensos quebra-mares (o do lado Norte com 1579 m e o do lado Sul com 1147 m) construídos em 1892, canal de navegação e docas. Os quebra-mares registaram ampliações posteriores (APDL, 2002);

- Douro – localizado no estuário do Douro, com pequeno quebramar construído até 1892 (APDL, 2002). Novos quebramares em construção;
- Aveiro – em 1808 foi efectuada a abertura e fixação de uma embocadura artificial. Em 1859 é construído um dique na margem Norte, realizando-se ampliações entre 1932 a 1936 e em 1951. No final da década de 50 efectuou-se o prolongamento do molhe Norte e a construção de um novo molhe Sul. De 1983 a 1987 realizou-se o prolongamento do quebramar Norte. O porto localiza-se no sistema lagunar e é actualmente caracterizado por um canal de navegação, diques, dois quebramares extensos e docas;
- Figueira da Foz – o porto localiza-se no estuário do Mondego e é caracterizado pelo canal de navegação, molhes de guiamento, dois quebramares extensos construídos entre 1962 e 1965 e docas.

Verificam-se intensas erosões em todos os troços costeiros a Sul destes portos: Amorosa – Castelo de Neiva, Vila do Conde, Mindelo, Espinho – Ovar, Costa Nova – Vagueira, Cova – Leirosa.

### **3.2.1.3 Dragagens e extracção de areias**

O valor económico da extracção e exploração dos sedimentos para serem utilizados como inertes é importante, mas o significado ambiental enquanto parcela de um caudal sólido que flui nas linhas de água e determina o seu estado de equilíbrio é igualmente importante. Assim, o desejável seria prever uma estratégia em que não fossem afectadas as condições de escoamento, navegabilidade e funcionamento das correntes. Numa análise de erosão e assoreamento, devem ser identificados os locais e volumes de inertes a extrair face às condições referidas e devem ser desenvolvidos programas de prevenção da erosão (PBH Minho, 2001).

Em Portugal, a partir da década de sessenta, o consumo de inertes essencialmente na indústria da construção civil tem sido um aspecto de pressão e enfraquecimento das fontes aluvionares que alimentam as praias do litoral português. A extracção dos inertes é feita, tanto no trecho litoral, incluindo portos e canais de navegação, bem como nos cursos de água que desaguam no mesmo litoral. Trata-se de um problema, a uma escala mundial, embora com diferentes níveis de controlo e de acuidade.

Até há duas décadas atrás chegou a haver extracção nas próprias dunas e praias. Em Decreto-Lei de 1980, o licenciamento da extracção de areias das praias e dunas litorais declara cativas todas as

formas arenosas situadas na faixa costeira compreendida entre a margem das águas do mar e uma linha paralela ao seu limite interior e dela afastada um quilómetro (HP, 1981a).

Na bacia hidrográfica do rio Minho realizam-se dragagens em Caminha, para assegurar a segurança de navegabilidade na zona de passagem do ferry-boat e há extracção ilegal de inertes (PHB Minho, 2001).

A extracção no curso inferior do rio Douro no ano de 1979 estima-se que rondasse os 1400000 m<sup>3</sup>/ano de areia, por análise dos registos dos areeiros em actividade na área de jurisdição da Direcção Hidráulica do Douro, afectados de um factor de correcção por subestima dos valores registados aos valores reais extraídos (HP, 1981a). A extracção de areias no Douro continuou e continua a assumir valores muito preocupantes porque nunca foi perspectivada em termos de impacte na zona costeira. Os valores oficiais estarão muito aquém dos valores reais o que torna muito problemático qualquer exercício de balanço de massas sedimentares na costa.

O segmento costeiro imediatamente a Norte do quebramar Norte da embocadura da ria de Aveiro é uma zona de intensa acumulação aluvionar. O avanço da linha de costa faz-se sentir numa extensão de quase 7 km para Norte. Curiosamente, no primeiro quilómetro na vizinhança do quebramar, a linha de costa em fotografia aérea de 1973 é praticamente coincidente com a linha registada em 1996, o que só se pode explicar pela intensa extracção de areia que se tem praticado de forma continuada nesta praia (CRL, 1998).

A extracção de areias em S. Jacinto, actualmente suspensa, era feita na zona inter-marés da praia e era objecto de hasta pública. Desde 1993, o volume máximo anual de areias a retirar era de 350000 m<sup>3</sup>, dividido por cinco lotes de 70000 m<sup>3</sup>, mas em anos anteriores atingiu valores de cerca do dobro deste.

O volume de dragados no porto de Aveiro, entre 1995 e 1999, terá ascendido a 2.1x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. As dragagens continuam. No porto da Figueira da Foz têm sido realizadas operações recentes de dragagem sem que haja uma mitigação de impactes pela deposição, ainda que parcial, de areias nas praias.

O estudo do consumo de cimento na região Norte do país em 1979 (registos fidedignos) e o conhecimento de que os inertes utilizados na construção civil são retirados quase exclusivamente do litoral entre o Douro e o Vouga e do rio Douro e seus afluentes, permitiu concluir que o

consumo de inertes à data de 1979 rondou os 5000000 m<sup>3</sup>/ano, valor que se prevê algo empolado. Poderá concluir-se com alguma fiabilidade que a extracção de areias em 1979 da faixa litoral entre o Douro e o Mondego e também do rio Douro e afluentes estará entre os 2500000 m<sup>3</sup>/ano e os 4000000 m<sup>3</sup>/ano (HP, 1981a). Estes montantes foram retirados do sistema morfológico costeiro e contribuíram para o agravamento dos fenómenos de erosão em curso.

#### **3.2.1.4 Destruição e danificação de cordões dunares**

Os cordões e campos dunares integram uma expressiva percentagem dos sistemas costeiros e estão associados a acções de movimentação de areias com origem eólica, ocorrendo interacções de ondas e marés em situações de tempestades.

As formações dunares são fundamentais na mitigação dos danos em situações de tempestades e do avanço do mar em consequência da erosão, na redução dos galgamentos e inundações, constituindo sistemas com grande valia ecológica e paisagística.

Estas formações foram frequentemente destruídas para permitir vistas para o mar, para extrair areias para a construção civil bem como para localizar edificações, indústrias, vias de circulação, estacionamento, apoios de praia. Foram também afectadas em resultado do intenso pisoteio, da circulação de veículos todo o terreno e nas actividades da arte xávega.

A ausência das dunas ou a redução das suas cotas de coroamento e espessuras criou fragilidades na protecção natural. A acção das ondas e das marés passou a ter consequências mais graves e por vezes irreversíveis já que desapareceu muita da capacidade de auto-recuperação dos perfis de praias e dunas após as tempestades.

Os Planos de Ordenamento e outros Instrumentos de Ordenamento têm recentemente contribuído para inverter o estado de degradação e de destruição de muitos sistemas dunares. Em Portugal, já são visíveis muitas acções de reabilitação e protecção de sistemas dunares.

### **3.2.1.5 Urbanização (construções nas zonas de interacção fisiográfica)**

A evolução cronológica dos aglomerados populacionais em aspectos relacionados com a demografia e com a caracterização da ocupação e das construções nas zonas de interacção fisiográfica permite avaliar a pressão que se exerce actualmente sobre o litoral. Trata-se de um problema de escala mundial. Essa pressão está associada à construção de habitações, rodovias, ferrovias, indústria, turismo, infra-estruturas portuárias comerciais, náutica de recreio, pesca e exploração de recursos oceânicos.

É por isso de grande importância a gestão integrada das zonas costeiras. Esta pode ser entendida como um processo contínuo e dinâmico pelo qual as decisões são tomadas com vista a um uso, desenvolvimento e protecção sustentável das zonas e recursos costeiros (Taussik e Gilbert, 2002). Este processo deve ser sustentável com base no conhecimento científico e aceitável por parte de quem toma as decisões de gestão e planeamento.

São 83 os municípios em Portugal que têm fronteira com o oceano Atlântico dos quais 19 nos Açores e 11 na Madeira. Com base em dados do INE (2002), a área dos concelhos limitados pelo oceano Atlântico corresponde a menos de 20% de todo o território nacional, mas as habitações e a residência da população ultrapassa actualmente os 30% do total. De acordo com a tabela 3.18, na região Norte, em apenas 5% da área da unidade territorial, a população residente é superior a 25% da população da mesma unidade, enquanto o edificado ultrapassa os 20%. Estes valores representam uma enorme pressão sobre o litoral.

Tabela 3.18: Pressão urbana exercida nos concelhos junto à costa, por comparação com cada unidade territorial (com base em dados do INE, 2002).

Região	Área junto à costa (km <sup>2</sup> )	%	N.º de edifícios junto à costa	%	População residente junto à costa	%
Portugal	17883.6	19.4	1009783	32.1	3535537	34.1
Norte	1074.5	5.0	237167	21.6	1029489	27.9
Centro	2923.8	12.4	190709	25.2	520924	29.2
Lisboa e Vale do Tejo	1605.7	13.3	203813	28.5	910005	26.2
Alentejo	5303.3	19.6	67441	18.3	213913	18.7
Algarve	3872.2	77.5	148513	93.1	374432	94.7
Açores	2321.9	100.0	87481	100.0	241762	100.0
Madeira	782.2	100.0	74659	100.0	245012	100.0

Em qualquer das unidades territoriais (exceptuando os arquipélagos dos Açores e da Madeira que são na totalidade compostos por concelhos litorais) a percentagem de edificado e de população residente é superior à percentagem de território que ocupa. Se for considerada a população sazonal que em período de Verão se desloca para as zonas litorais, então a pressão que actualmente se exerce sobre o litoral é enorme, infelizmente traduzida em erros de planeamento e construção que prejudicam as defesas naturais aos processos de erosão.

De acordo com os números referidos por Andrade e Freitas (2002), a costa portuguesa tem uma extensão de 1846 km, dividida pela costa continental (943 km), o arquipélago dos Açores (691 km) e da Madeira (212 km). Os padrões de ocupação da costa portuguesa alteraram-se nas últimas décadas, em essencial devido ao rápido desenvolvimento, acompanhado por mudanças políticas e económicas. Os sectores secundário e terciário ganharam importância na economia portuguesa e o turismo é um relevante contribuinte, tendo a costa como um poderoso atractivo. De 1997 até 2000 o turismo representava 4.2% do PIB e subiu para 8.0%. Estima-se que as oportunidades de emprego relacionadas com o turismo sejam de cerca de 9% do total.

### 3.2.2 Intervenções de Defesa das Zonas Costeiras

Historicamente o Homem pressiona, intervém e condiciona a evolução das zonas costeiras. A dinâmica costeira é frequentemente incompatível com a ocupação e usos da faixa costeira. Cada intervenção na natureza tem sempre múltiplos efeitos. Intervenções ainda que muito localizadas poderão ter repercussões em extensões mais latas da costa.

Em muitos Países e nomeadamente em Portugal, até ao final da década de oitenta, associava-se a “Protecção Costeira” exclusivamente à construção de obras de defesa (esporões e obras aderentes) para reduzir os riscos de exposição das frentes edificadas à acção das ondas e marés. Não existiu uma aposta no ordenamento o qual tem objectivos muito mais vastos do que a redução desses riscos (embora tenha também de os equacionar e reduzir). A opção “Protecção”, num sentido global, para que seja ambientalmente correcta e economicamente comportável deverá, na perspectiva que se defende, incluir a “conservação”, a “reabilitação” e a “valorização”, contemplando acções de retirada ou de acomodação em zonas muito específicas. Pressupõe decisões políticas de grande responsabilidade pelas profundas implicações de natureza social, cultural, económica e técnica, nas actuais e futuras gerações. É um processo dinâmico que envolve uma estratégia de gestão com três níveis igualmente importantes (Veloso-Gomes e Taveira-Pinto, 1997):

- uma nova gestão do uso do solo;
- intervenções no sentido da redução de acções antrópicas específicas;
- manutenção, em termos médios, da “linha de costa” actual.

A história do desenvolvimento das comunidades costeiras mostra que na maioria das situações não houve um correcto planeamento e ordenamento. Em termos de defesa costeira, normalmente as soluções começavam pela colocação de alguns blocos de rocha para proteger alguma zona singular, crescendo depois para pequenas estruturas de defesa, grandes intervenções e frentes contínuas de intervenções de defesa e até projectos de alimentação de praias. O problema era entendido como uma questão local e não como uma questão regional ou global e raramente colocava em causa a localização do edificado com necessidade de defesa em relação às acções do mar.

A regulamentação, normalmente na forma de planos de ordenamento surgiu posteriormente e, em muitos casos recentemente. Começou a introduzir restrições à edificabilidade para além das que já existiam (muitas vezes não cumpridas) no Domínio Público Hídrico. Esta perspectiva de “actuação



antes dos factos” será de relativamente fácil incorporação em áreas em desenvolvimento, mas difícil em áreas costeiras já edificadas. Os planos necessitam de previsões da evolução da linha de costa e da evolução da exposição do edificado às acções directas e indirectas do mar (galgamentos, inundações, impactes das ondas, deslizamentos, roturas).

As intervenções de defesa da costa podem ser de diversos tipos. Têm em comum o facto de tentar mitigar problemas de dimensão local ou regional, que se verificam geralmente por efeito da erosão. As possibilidades de intervenção de defesa costeira em zonas muito vulneráveis incluem obras perpendiculares à costa (espordões), paralelas à costa (estruturas aderentes e quebramares destacados), alimentações artificiais com areias (a cotas positivas e/ou negativas), a ripagem de areias e a execução/reconstrução de dunas artificiais, bem como soluções mistas. Todas estas possibilidades devem ser bem avaliadas antes de utilizadas, pois qualquer delas representa uma interferência com o meio e consequentemente terá resultados que muitas vezes ultrapassam o conhecimento actual. Os fenómenos hidromorfológicos têm-se agravado, os custos de defesa na costa portuguesa têm vindo a aumentar, o edificado urbano continua a crescer em zonas muito críticas. É necessário avaliar e perceber os fenómenos envolvidos e fazer projecções.

A dinâmica da costa litoral entre Espinho e a Nazaré é essencialmente dependente dos processos de transporte sedimentar longitudinal. Estruturas artificiais, como os quebramares da barra de Aveiro, os canais de navegação e os diversos campos de esporões e obras longitudinais aderentes interferem no transporte para sotamar. As praias de Cortegaça e do Furadouro (a Sul de Espinho), Costa Nova e Vagueira (a Sul de Aveiro) e a Sul da Cova e Gala (a Sul do porto da Figueira da Foz) experimentam índices de erosão intensos, chegando a exceder os 8 m/ano a 10 m/ano. A simulação das evoluções da costa, adoptando cenários com e sem obras de defesa, possibilitará uma avaliação da sua eficácia em termos de impactes positivos e negativos. Quando o custo de manutenção da defesa é superior ao valor do património a proteger há que por em causa essas defesas.

Segue-se uma breve descrição dos diversos tipos de intervenções possíveis, fazendo-se uma distinção entre as soluções com o objectivo de manter a posição da “linha de costa” e outras, usualmente designadas de “ligeiras”, que se caracterizam pela alimentação e reperfilamento das praias.

### 3.2.2.1 Intervenções de manutenção da posição da “linha de costa”

Estas intervenções caracterizam-se em geral por serem estruturas que reflectem e/ou dissipam a energia das ondas (possibilitando a pré-rebentação) ou retêm a areia de forma a aumentar a dimensão da praia.

Dentro desta categoria de estruturas, podem ser considerados dois grupos principais: estruturas paralelas à costa e estruturas perpendiculares à costa. Este tipo de intervenção foi muito comum ao longo dos tempos, mesmo antes do tempo dos romanos. Existem muitas estruturas de características mistas. Algumas das desvantagens associadas a este tipo de estabilização da costa só agora começam a ser conhecidas (WCU, 2003).

#### Estruturas paralelas à costa

Como estruturas paralelas à costa, podem diferenciar-se os muros e paredões de retenção, as obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados. A figura 3.18 representa esquematicamente este tipo de estruturas.

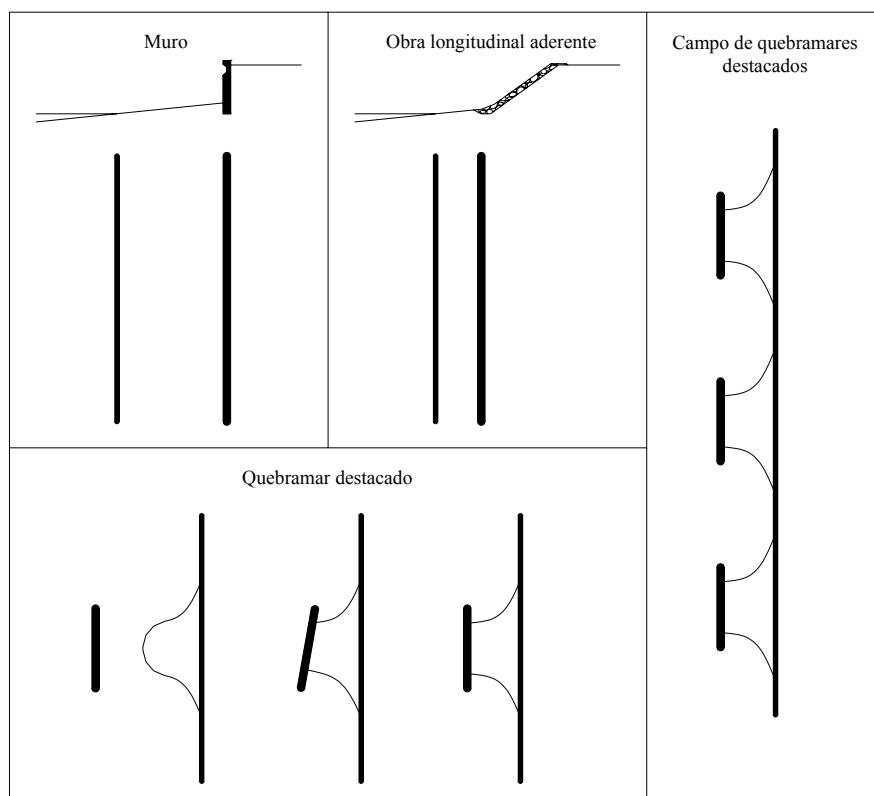


Figura 3.18: Esquema de estruturas paralelas à costa.

Os muros e paredões estão frequentemente associados à retenção de terraplenos marginais para arruamentos, edificações e parques de estacionamento. Podem ser de madeira, rocha ou betão e poderão ser projectados para proteger a parte posterior do edificado ou da praia do impacte das ondas. Frequentemente foram edificados em frentes ribeirinhas quando existia praia mas com o progressivo emagrecimento ou desaparecimento da mesma, passaram a ser submetidos à acção directa das ondas podendo ser galgados ou destruídos. A sua superfície exposta se for vertical e pouco rugosa e porosa não favorece a estabilidade do areal devido à reflexão das ondas. A fundação dos muros deve atingir uma cota baixa para evitar as subescavações atingindo, se possível, o estrato rochoso.

Tal como os muros, as obras longitudinais aderentes como os revestimentos longitudinais são uma solução comum na costa portuguesa. Encontram-se obras longitudinais aderentes em quase todos os campos de esporões construídos em Portugal. A solução estrutural consiste na colocação de rocha (ou blocos de betão) ao longo de uma face da duna ou num talude inclinado da praia, reduzindo a acção das ondas, por absorção da energia nas faces e espaços vazios das rochas. Algumas soluções com outros materiais começam também a ser testadas, tal como elementos de geosintéticos, utilizando também a própria areia da praia.



Figura 3.19: Obras longitudinais aderentes, em Cortegaça e Esmoriz.

No entanto, as soluções agora referidas apresentam algumas desvantagens. É evidente a degradação do valor (recreativo, estético, etc.) da praia, por diminuição da área útil da praia (ocupada pela estrutura), por impacte visual negativo e por introdução de dificuldades de acesso à própria praia. Nas zonas costeiras em erosão, as obras longitudinais aderentes funcionam como “alinhamentos” fixos de referência e à medida que a praia vai erodindo, vai ficando mais estreita.

O impacto destas estruturas na zona frontal da praia e nos troços vizinhos deverá ser avaliado efectuando simulações de evolução da costa, com e sem a presença das estruturas. Com efeito, estão presentes fenómenos a uma escala geológica (elevação do nível das águas), fenómenos associados a alterações nas bacias hidrográficas, retenções e extracções sedimentares nos portos, efeito de “sombra” de outras estruturas como esporões e fenómenos hidrodinâmicos locais gerados pela estrutura.

Os pequenos cabos que se podem gerar ilustram o recuo generalizado da costa, recuo contido localmente por uma obra aderente eventualmente associada a outras estruturas (ver figura 3.20). A médio/longo prazo poderá apenas restar a alternativa de “retirada” da povoação, com impactes sócio-económicos a avaliar.



Figura 3.20: Exemplo de Cortegaça, onde é evidente a formação de um pequeno cabo originado pelo efeito de contenção local da obra de defesa aderente (foto retirada de EUrosion, 2003).

Estas soluções obrigam a operações de manutenção, tanto mais que frequentemente não têm fundações em terreno “firme” e estão geralmente em zonas submetidas a processos erosivos. As extremidades deste tipo de estruturas são em geral problemáticas, devendo sempre que possível, terminar na junção com outras estruturas vizinhas. A figura 3.21 representa a extremidade livre de uma obra aderente.



Figura 3.21: Remate de uma extremidade livre da obra de protecção da Vagueira.

Os quebramares destacados são estruturas localizadas nas zonas imersas, usualmente paralelas à costa, com coroamento emerso ou submerso, projectadas para reduzir a energia das ondas. Desta forma, há redução de transporte de sedimentos nesta zona, causando o acumular de sedimentos na zona abrigada da estrutura com formação de um tómbolo de difracção.

Os quebramares destacados, quando utilizados de forma consecutiva formam um campo de quebramares. Em geral, a solução de quebramares destacados é eficaz na protecção e defesa dos locais onde são construídos. No entanto, o valor estético da praia é prejudicado, principalmente no caso dos quebramares com coroamento emerso.

Se a retenção de areias por trás do quebramar originar um tómbolo de dimensões apreciáveis e se existir transporte sedimentar longitudinal, este pode ser interrompido e a estrutura passa a ter um comportamento análogo ao dos esporões, com eventuais erosões a sotamar.

Em Portugal, já se recorreu à utilização de quebramares destacados em Castelo de Neiva e na Aguda, ambos com função de apoio à comunidade piscatória.

#### Estruturas perpendiculares à costa

Ao contrário das estruturas paralelas à costa, que são previstas para reduzir o efeito da energia das ondas, as estruturas perpendiculares à costa, em geral têm como principal função a retenção do transporte longitudinal de sedimentos, formando praias por depósito de areias. Na figura 3.22 estão esquematizadas algumas destas soluções, por vezes adoptadas em conjunto com estruturas paralelas à costa.

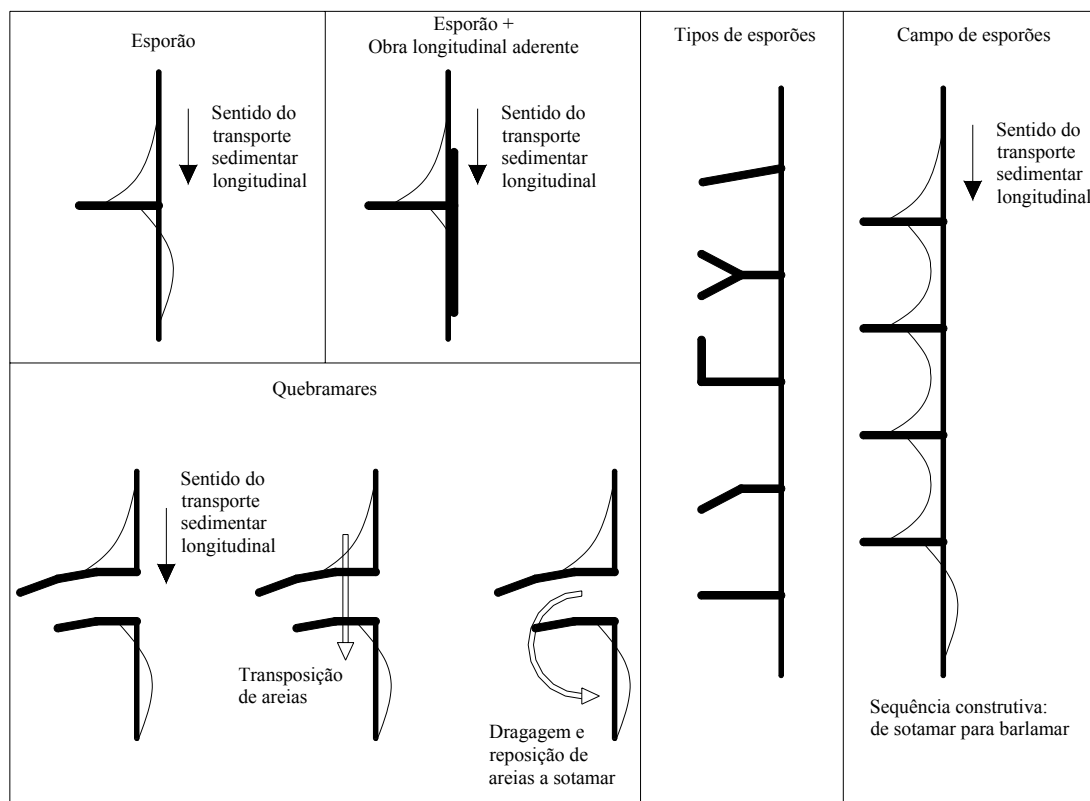


Figura 3.22: Esquema de estruturas perpendiculares à costa.

Os esporões são estruturas perpendiculares à linha de costa, executadas normalmente em blocos de enrocamento, blocos de betão, cortinas de estacas-prancha metálicas ou em madeira. São projectados para reter os sedimentos que são transportados longitudinalmente à praia, reconstruindo praias erodidas, pelo que quanto mais compridos e altos forem maior a sua eficácia a barlamar. Mas quanto maior for essa eficácia a barlamar, maiores serão os impactes negativos a sotamar em resultado dessa mesma retenção. Esse impacte negativo a barlamar poderá ser permanente e irreversível ou poderá ser temporário e reversível se após alguns anos o transporte longitudinal for novamente retomado por “saturação” do esporão.

Os esporões são por vezes utilizados em conjunto com obras longitudinais aderentes (figura 3.23) ou ainda com projectos de alimentação artificial de areias. Estas intervenções mistas existem em zonas muito críticas ou como uma tentativa de mitigar impactes negativos e minorar custos associáveis a cada uma das intervenções se fossem consideradas isoladamente.



Figura 3.23: Esporão isolado e esporão em continuidade com revestimento longitudinal.

Para que o esporão realize a função para que foi projectado, é necessário que se verifique transporte sedimentar, e nessas situações irá ocorrer a acumulação de areias a barlar do esporão. Quando não há transporte sedimentar longitudinal, a solução de esporões não deve ser adoptada. Se o transporte sedimentar sofrer uma redução acentuada ao longo da vida de um esporão, a sua eficácia passa a ser cada vez mais reduzida.

Na análise de Oliveira (1997), que se resume na figura 3.24, um esporão tem uma capacidade limite de acumulação sedimentar. Esgotada a capacidade limite, o esporão deixa de constituir um obstáculo à passagem de caudal sólido e o défice sedimentar que existe a sotamar volta a ser igual ao défice sedimentar de barlar. Por isso, o agravamento do processo erosivo a sotamar manifesta-se apenas durante o período de enchimento do esporão e decresce progressivamente no tempo. Porém, se o esporão for extenso em termos relativos, ainda que saturado, os sedimentos que passarão a contornar a sua cabeça poderão ficar a profundidades relativas tais que as ondas de pequena e média energia não têm capacidade de transportar os sedimentos para as praias imediatamente a sotamar. Quando muito essa reposição verificar-se-á a distâncias consideráveis do esporão.



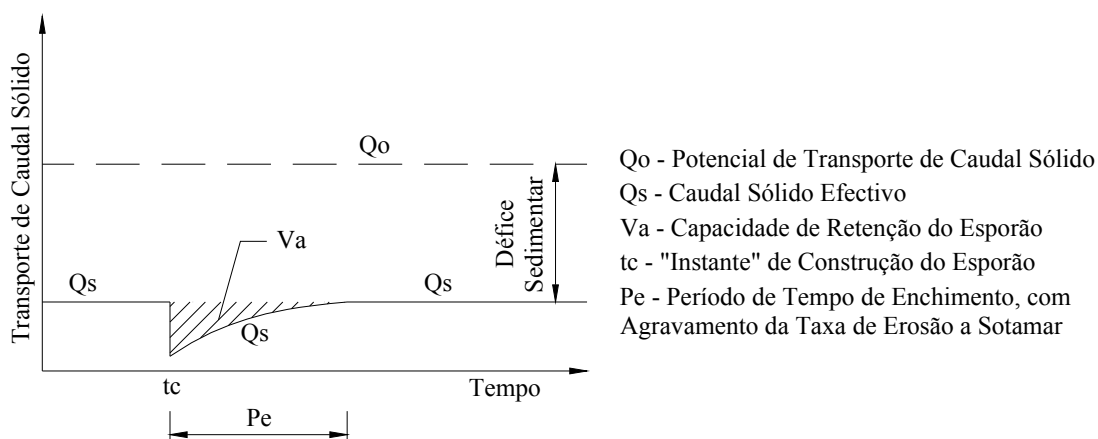


Figura 3.24: Transporte sólido longitudinal na secção de implantação de uma estrutura perpendicular à costa (adaptado de Oliveira, 1997).

Em Portugal, são diversos os campos de esporões construídos. Podem referir-se os casos de Ofir, Esmoriz, Cortegaça, Costa Nova, Vagueira, Cova/Gala, Costa da Caparica e Vilamoura/Quarteira. Os esporões de configuração não rectilínea em planta existem na frente urbana de Espinho e mais recentemente, no Areão e Poço da Cruz. Estes destinam-se a proporcionar o efeito de difracção a sotamar, com acumulação de areias no enraizamento do esporão.

Os quebramares portuários são estruturalmente análogos aos esporões (embora mais complexos), mas são utilizados especificamente para estabilizar canais de navegação de acesso a portos. Têm como principal objectivo tornar a navegação mais segura e a manutenção dos canais de navegação mais económica. Em geral, são mais extensos que os esporões e por isso interrompem mais o transporte sedimentar longitudinal podendo gerar grandes acumulações a barlar e erosões a sotamar. Por isso, não se considera o quebramar como uma intervenção de defesa.

A costa portuguesa apresenta numerosos casos de quebramares portuários, com maior ou menor impacto negativo nas zonas costeiras a sotamar e beneficiando em geral da acumulação de sedimentos nas zonas costeiras a barlar. Além dos já referidos quebramares portuários de Vila Praia de Âncora, Viana do Castelo, Póvoa do Varzim, Vila do Conde, Leixões, Douro (em construção), Aveiro e Figueira da Foz, podem enumerar-se os da Nazaré, Peniche, Cascais, Sesimbra, Sines, Baleeira, Alvor, Portimão, Albufeira, Vilamoura, Faro, Tavira e Vila Real de Santo António.

Para mitigar estes impactes negativos associados a quebramares é possível adoptar sistemas de transposição de sedimentos, que permitam dar continuidade de circulação dos sedimentos de



barlamar para sotamar. São soluções técnicas desejáveis mas de difícil concepção e manutenção pelo que ainda não há instalações em Portugal ainda que se fale das mesmas há algumas dezenas de anos. Esta transposição artificial de areias constitui um exemplo do que seria uma “intervenção no sentido da redução de acções antrópicas específicas”. Outro exemplo será a redução dos volumes de dragagem e a colocação de produtos dragados nas praias e dunas.

### 3.2.2.2 Intervenções de alimentação e reperfilamento das praias

As técnicas de estabilização da linha de costa recorrendo a intervenções designadas como “ligeiras” são em geral mais amigas do ambiente, mas não deixam de envolver questões técnicas e ambientais delicadas e custos que poderão ser de difícil avaliação. Questões a longo termo continuam por esclarecer e quantificar. Por exemplo, no caso de utilização de fontes de sedimentos, estas vão ser cada vez mais escassas e localizadas a distâncias superiores e a profundidades mais elevadas, aumentando custos e riscos ambientais.

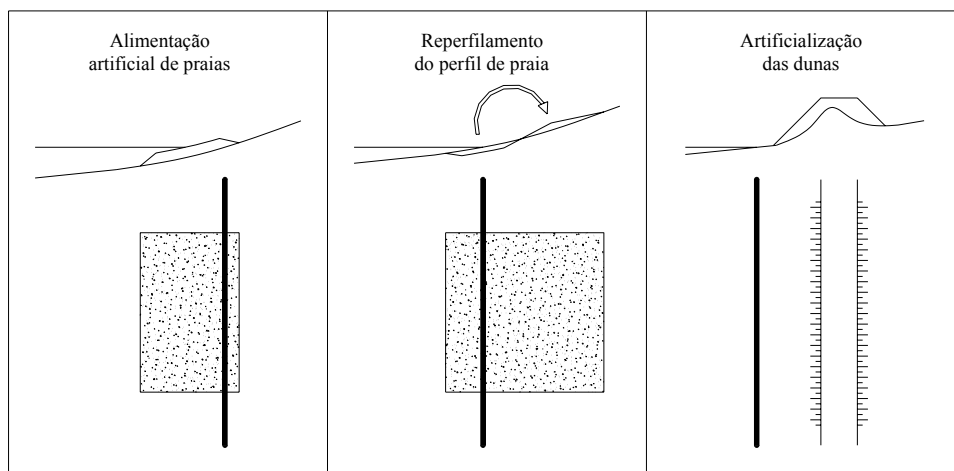


Figura 3.25: Esquema de intervenções de alimentação e reperfilamento das praias.

As intervenções de estabilização da costa que aqui se apresentam tentam manter (em termos médios) a posição da linha de costa por adição de areia ou plantação de vegetação para reter os sedimentos, mantendo o valor recreativo e ambiental da praia. Estas soluções tentam trabalhar com os processos da natureza, ao contrário de lhes tentar fazer frente.

### Alimentação artificial de praias

A alimentação artificial de praias é uma técnica que em determinadas circunstâncias é promissora ao manter uma praia com fins de defesa e recreativos. A colocação de areia na praia obriga à existência de uma fonte sedimentar, que em geral provem de dragagens, mas pode também ser de zonas interiores à costa ou de locais imersos. Quando há disponibilidade de areias com qualidade provenientes de dragagens (por exemplo de canais de navegação e docas), esta deve ser utilizada para alimentação das praias, repondo os sedimentos no sistema.

Apesar das potencialidades desta técnica, vários problemas já se colocam. Em muitos casos, as praias alimentadas artificialmente têm erosões superiores às praias naturais (que por sua vez podem ser muito elevadas), já que em geral a areia colocada artificialmente sobre a praia resulta num perfil que não está em equilíbrio com o clima de agitação. Os períodos de recarga de areias na praia poderão ser inferiores aos estimados em projecto, obrigando a custos de manutenção elevados. A avaliação destes custos é ainda de difícil quantificação.

Apesar dos modelos físicos e numéricos, as previsões de cada projecto de alimentação de praias é uma experiência única com resultados únicos e em que cada experiência tem um alto custo. É uma técnica cara, particularmente em costas sem protecções naturais, sem obras de defesa e expostas a acções hidrodinâmicas com elevados níveis energéticos (fortes correntes de deriva e défice sedimentar).

Esta solução tem também um custo ambiental elevado. As dragagens ao largo para abastecer a praia podem criar desequilíbrios e instabilidades com consequências para os ecossistemas ao largo. A opção de alimentação de uma praia pode gerar desenvolvimento nessa zona, criando a obrigação de protecção da população, pelo que planeamento cuidadoso tem que ser previsto (WCU, 2003).

Em Portugal existem alguns exemplos de alimentação artificial de praias com sucesso (praia da Rocha e praias adjacentes a leste, praia de Vilamoura, no Algarve) para além do conhecido caso internacional de Copacabana, no Brasil, estudado pelo LNEC. Têm em comum uma exposição a um clima moderado de agitação marítima e a existência de confinamentos naturais ou artificiais nos seus limites (quebramares, morros, afloramentos rochosos). Por outro lado, a alimentação artificial de Vale do Lobo, no Algarve, também com uma exposição a um clima moderado de agitação mas sem confinamentos que contribuam para a retenção dos sedimentos, terá uma vida útil muito inferior (da ordem dos cinco anos). Em zonas costeiras do Mediterrâneo, com exposição a climas

pouco energéticos e dotadas de confinamentos naturais e artificiais, existem numerosos exemplos de sucesso de alimentação artificial com areias.

A experiência adquirida com a colocação de cerca de dois milhões de metros cúbicos de areia na praia do Castelo do Queijo, no Porto, com uma exposição a um clima de agitação muito energético e com concentrações de energia, possibilita a conclusão da precaridade da solução se a mesma não for acompanhada por outras intervenções que contribuam para alguma estabilização das areias. A médio prazo prevêem-se operações de alimentação artificial na Costa da Caparica (clima de agitação moderado, campo de esporões) e na Costa Nova (clima de agitação muito energético, campo de esporões). Neste último caso prevê-se uma operação de transposição artificial de areias dragadas a Norte do quebramar Norte da barra de Aveiro, com reposição nas praias.

Na modelação das evoluções fisiográficas onde tenham ocorrido ou estejam previstas operações de alimentação artificial de areias e/ou transposição artificial de “obstáculos”, como quebramares e canais de navegação, no domínio em estudo deverão ser introduzidos volumes sedimentares. A simulação de diversos cenários (volumes introduzidos, distribuição no tempo, localização e configuração das “manchas” alimentadas, localização das “manchas” de empréstimo) possibilitará uma avaliação da eficácia e custos dessas operações para diferentes horizontes de avaliação.

#### Reperfilamento de areias na praia

Por vezes, em vez de se considerar uma alimentação artificial com areias provenientes de fora do sistema a ser intervencionado, pode optar-se apenas por um reperfilamento das areias da praia. A movimentação de areias da praia, desde zonas de entre marés para zonas de cotas mais elevadas, operação designada por ripagem de areias, pode ser entendida como uma forma de mitigar os problemas de erosão, nomeadamente em situações de emergência ou como medida paliativa. A utilização de maquinaria de terraplenagens é suficiente para remover uma camada de areia de pequena espessura (0.20 m a 0.50 m) das zonas baixas com reposição em zonas mais altas. O objectivo é aumentar a área de praia acima do nível de maré, funcionando como protecção e aumentando também a área recreativa. Este método permite preencher alguma área mais fragilizada da praia e encorajar a acreção de sedimentos adicionais nas zonas de menor cota, na expectativa de que se verifique um balanço sedimentar positivo na praia.

Os resultados desta técnica em Portugal (Moledo do Minho, Sul de Espinho, Costa Nova, Areão, Vagueira) mostram que haverá algum sucesso a curto prazo, mas a longo termo não será uma

solução eficiente. Há que considerar alguns efeitos potencialmente negativos: a falta de areia na zona baixa da praia pode interromper temporariamente o transporte de areia para sotamar, o perfil transversal vai ficar com uma maior inclinação e tenderá a evoluir no sentido de retomar o perfil anterior, os micro-organismos na praia serão perturbados.

A aplicação desta técnica restringe-se a praias que ainda possuam alguma largura.

#### Intervenções de artificialização nas dunas

Em zonas onde os cordões dunares se apresentam fragilizados, ou simplesmente já não existem, é frequente a tentativa de reconstrução por meios artificiais (ver figura 3.26).



Figura 3.26: Artificialização das dunas na restinga Sul da ria de Aveiro.

Os locais mais vulneráveis dos cordões dunares (naturais ou artificiais) poderão ser reforçados através da colocação de areia que restabeleça a continuidade da duna. Poderá ser uma forma económica e efectiva de minorar os perigos associáveis às situações de erosão e inundações, de atender a situações de emergência possibilitando o adiamento do problema com vista a tomar medidas de ordenamento do território ou proceder a intervenções que exigem maiores meios financeiros.

Uma duna artificial com um núcleo estrutural em enrocamento ou em blocos de betão, construída num troço em evolução acaba por funcionar como uma barreira ou como um revestimento longitudinal, pois as dunas não são estáticas e rígidas como as estruturas permanentes. Esse poderá ser um objectivo de defesa costeira. No entanto, se a estrutura do núcleo ficar danificada ou

destruída pelas acções do mar (infra-escavações, destruição do perfil), o efeito de “barreira” ao avanço do mar desaparecerá.

Estes aspectos relacionados com a maior ou menor estabilidade destas dunas ou diques artificiais deverão ser considerados na modelação da evolução da “linha de costa” ao longo do tempo.

A vegetação natural tem alguma capacidade para reter as areias das dunas, ajudando na sua estabilização. A plantação de vegetação (repovoamento vegetal) funciona como uma restituição à duna de elementos favoráveis ao seu robustecimento. Através das suas raízes, as plantas criam uma malha que contribui para a estabilização do sistema dunar. Porém, nas situações em que as dunas sofrem a acção directa das ondas do mar, a vegetação por si só poderá não ser eficaz para essa estabilização. Existem inúmeros exemplos ao longo da costa portuguesa (e em especial a Sul da embocadura de Aveiro) em que os cordões dunares foram muito afectados ou mesmo destruídos em situações de tempestade, apesar de estarem cobertos com vegetação nativa.

A areia salinizada habitualmente utilizada na construção de dunas artificiais ou de diques artificiais de areia, adia a possibilidade de utilização de vegetação, pois são necessários alguns anos até que a areia tenha características necessárias ao crescimento da flora. A vegetação natural que estabiliza as dunas está em equilíbrio com os sedimentos e o biota. A plantação em dunas artificiais é por isso complexa, pois até as diferenças de dimensão dos sedimentos naturalmente soprados pelo vento ou ali colocados pelas máquinas vão influenciar a estabilização das dunas e o crescimento da vegetação.



Figura 3.27: Plantação de vegetação em dunas e colocação de paliçadas, como formas de retenção de areias.

Na figura 3.27, a fotografia da esquerda pretende exemplificar situações de plantação de vegetação em zonas fragilizadas de dunas. Da mesma forma que as plantas, o objectivo da colocação de paliçadas é a retenção das areias das dunas. A colocação das paliçadas encoraja o processo natural de retenção de areias nas dunas, servindo ainda de protecção ao tráfego (pedonal ou motorizado) sobre as mesmas. As paliçadas devem ser colocadas de ambos os lados da duna, mas não devem impedir o equilíbrio dinâmico, permitindo que haja migração natural das areias. Este método, mantém toda a areia no sistema costeiro, e até pode adicionar de forma natural, areia ao sistema.

A limitação e controlo dos acessos à praia podem ser entendidos como uma forma de impedir a erosão e destruição das dunas por pisoteio. A informação da sociedade sobre a importância das dunas é uma importante medida de formação das populações, para que se crie uma consciencialização de preservação do património ecológico dunar e de preservação de uma defesa natural das zonas costeiras.



Figura 3.28: Acessos pedonais às praias e painéis de informação sobre a importância das dunas.

**Capítulo 4**  
**PROCESSOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR**

Ó mar tu és um leão  
Que a todos queres comer;  
Não sei como os homens podem  
As ondas do mar vencer!

*Recolhido por Jaime Cortesão (in Quadras do Mar)*





## **4 PROCESSOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR**

Neste capítulo é abordado o tema de transporte de sedimentos ao longo da costa e transversalmente a esta. O transporte sedimentar proporciona o ajuste ao longo do tempo da relação morfodinâmica entre a topografia e a dinâmica dos fluidos (Cowell *et al.*, 1999).

Pretende-se resumir os principais processos do comportamento das areias no mar. O início do movimento das partículas, o comportamento destas em suspensão no fluido, as formas do fundo e a rugosidade efectiva que o próprio fundo toma para o escoamento são exemplos dos problemas relacionados com o transporte sólido longitudinal. A forma do perfil transversal, a pendente da praia e as probabilidades de erosão ou acreção que lhe estão associadas são objecto de numerosos estudos. A compreensão destes processos envolve uma grande diversidade de grandezas e a tradução destes fenómenos físicos por modelos matemáticos que permitam a projecção de quantidades transportadas ainda é realizada com muitas insuficiências.

### **4.1 Elementos Sobre a Água do Mar e Sedimentos**

Nesta secção pretende-se fazer uma caracterização das principais propriedades físicas dos elementos que são intervenientes nos processos costeiros (água do mar e sedimentos das praias). Algumas das propriedades são fundamentais para a aplicação dos modelos que se apresentam nas secções e nos capítulos seguintes.

#### **4.1.1 Propriedades da Água do Mar**

É através da água do mar que a generalidade dos agentes do clima de agitação actuam. A interacção entre a água do mar e a costa mantém permanente a dinâmica de transformação da forma das praias e zonas costeiras. A massa volúmica e a viscosidade são duas definições importantes na caracterização da água do mar em alguns dos conceitos e modelos que se apresentam posteriormente.

A massa volúmica da água do mar é função da temperatura e diminui com o aumento desta. Esta variável é também função dos cloretos presentes na água. O valor da massa volúmica ( $\rho$ ) pode ser obtido pela expressão 4.1.

$$\rho = 1000 + 1.455 CL - 0.0065 (Te - 4 + 0.4 CL)^2 \quad (4.1)$$

Nesta expressão,  $Te$  representa o valor da temperatura da água expressa em graus centígrados. O teor de cloretos ( $CL$ ) resulta de:

$$S = 0.03 + 1.805 CL \quad (4.2)$$

onde  $S$  é a salinidade, expressa em permilagem. Soulsby (1997) refere o valor de  $1027 \text{ kg/m}^3$  para a massa volúmica da água a  $10^\circ\text{C}$  e com salinidade de 35 partes por mil. É este o valor que correntemente se aplica.

A viscosidade cinemática da água é usualmente representada pelo seu coeficiente. O coeficiente de viscosidade cinemática da água do mar ( $\nu$ ) é função da temperatura e diminui com o aumento desta. Esta variável é ainda função dos níveis de concentração de sedimentos e da salinidade da água. O valor de  $\nu$  pode ser obtido pela equação 4.3, que exprime o coeficiente de viscosidade apenas em função da temperatura da água.

$$\nu = \left[ 1.14 - 0.031 (Te - 15) + 0.00068 (Te - 15)^2 \right] \times 10^{-6} \quad (4.3)$$

$Te$  representa novamente o valor da temperatura da água expressa em graus centígrados. Existem outras propostas (por exemplo: Einstein, Bagnold) em que as expressões incluem também o efeito da concentração de sedimentos. Soulsby (1997) indica o valor de  $1.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  para água a  $10^\circ\text{C}$  e salinidade de 35 partes por mil, mas refere também uma incerteza de cerca de 10% na determinação deste valor. O valor obtido pela equação exposta para a água do mar a  $10^\circ\text{C}$  é de  $1.312 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Em geral, a caracterização da água do mar por estas grandezas é pacífica, não oferecendo motivo para grandes discussões.

#### 4.1.2 Propriedades dos Sedimentos da Costa

O movimento dos sedimentos que existem na praia (emersa e submersa) é que traduz a visível dinâmica da configuração da costa. A caracterização das propriedades dos sedimentos é por isso importante, mas como se verá, depende de alguns factores que elevam a incerteza da sua quantificação numérica.

A dimensão das partículas dos sedimentos é um aspecto fundamental na caracterização de diversos processos costeiros, como por exemplo o de transporte longitudinal de deriva litoral. Em geral, a esta grandeza estão associadas muitas outras, dependentes dos valores escolhidos para definir a dimensão das areias.

Como é referido por King e Galvin (2002), a dimensão dos grãos de areia da praia varia no tempo e no espaço. Segundo este autor, no Inverno a dimensão dos sedimentos da praia é tipicamente maior do que no Verão. A variabilidade da dimensão dos grãos é também maior na parte da praia deixada a descoberto na maré baixa do que na praia emersa (facto visível na figura 4.1). No entanto, uma simples amostra é suficiente para uma caracterização grosseira dos sedimentos de um local. A conjugação de conjuntos de amostras é também viável e pode ser feita pela junção de várias amostras antes da sua análise ou por combinação matemática dos resultados de cada amostra. King e Galvin (2002) referem que as amostras recolhidas na zona entre marés são as que melhor representam as características das praias.



Figura 4.1: Variabilidade da dimensão dos sedimentos de uma praia, em período de maré baixa.

Nota-se portanto que, a obtenção duma amostra que permita classificar os sedimentos de um local envolve desde logo algum erro. A dimensão média dos sedimentos é variável ao longo do perfil transversal de uma praia. Numerosos estudos investigaram esta distribuição, que reflecte a

topografia dos fundos, a turbulência e dissipação de energia de cada local. A maior dimensão dos sedimentos está localizada na zona de rebentação das ondas (Komar, 1976). Soulsby (1997) indica que a incerteza associada à determinação da dimensão média das areias é de cerca de 20%.

A forma de exprimir esta dimensão está generalizada como sendo  $d_n$ , onde  $n$  representa a percentagem em massa, de partículas com dimensão inferior a determinado valor. Os percentis mais relevantes e com mais utilização são em geral o  $d_{50}$  (dimensão média) e o  $d_{90}$ .

Para caracterizar o tamanho das partículas pode ainda ser definido um parâmetro adimensional de dimensão dos grãos ( $D_*$ ), que depende não só da própria dimensão das partículas, mas também reflecte a influência da sua densidade e de características do fluido onde se encontra (viscosidade e densidade). A expressão que a caracteriza é:

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4.4)$$

Para além das grandezas já atrás referidas,  $g$  representa a aceleração da gravidade, tomando o valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$ . A adopção do valor de  $\rho_s$  também é pacífica para a diversidade de autores e pode representar segundo Soulsby (1997) um pequeno erro de  $\pm 2 \%$  na caracterização real da grandeza. A relação entre as massas volúmicas dos sedimentos e do fluido é normalmente designada por  $s$ :

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 Velocidade de Queda das Partículas

Na aplicação de modelos de cálculo de transporte sólido, a caracterização da velocidade de queda das partículas em suspensão é fundamental para a determinação do transporte de carga em suspensão, mas não tem influência nos resultados da carga transportada junto ao fundo. Esta grandeza é dependente das características da granulometria dos sedimentos e também do meio fluido onde estes se encontram.

A velocidade de queda ou de sedimentação ( $\omega_s$ ) é normalmente referida à dimensão das partículas em suspensão e não à dimensão das partículas do fundo. Esta constatação significa na realidade

uma redução das dimensões das partículas, pois são normalmente as partículas de menor dimensão e peso que se encontram em suspensão. Soulsby (1997) indica a proposta de Rijn (1984), que propõe a seguinte relação entre o diâmetro médio das partículas em suspensão e das partículas do fundo:

$$\begin{aligned} \frac{d_{50,s}}{d_{50}} &= 1 + 0.011(\sigma_s - 1)(T_s - 25) && \text{para } 0 < T_s < 25 \\ \frac{d_{50,s}}{d_{50}} &= 1 && \text{para } T_s \geq 25 \end{aligned} \quad (4.6)$$

desde que:  $(\sigma_s - 1) < \frac{1}{0.011(25 - T_s)}$

Na expressão 4.6,  $\sigma_s$  (coeficiente de graduação) representa uma relação entre diferentes percentis que caracterizam a granulometria da areia em análise e a aproximação da representação da granulometria a uma distribuição logarítmica normal.  $T_s$  é um parâmetro de transporte. Estes podem ser definidos pelas equações 4.7 e 4.8.  $d_{50,s}$  representa o diâmetro médio das partículas em suspensão.

$$\sigma_s = 0.5 \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad (4.7)$$

$$T_s = \frac{\tau_{0s} - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (4.8)$$

Na equação 4.8,  $\tau_{0s}$  e  $\tau_{cr}$  representam respectivamente a tensão tangencial efectiva no fundo devido aos grãos e a tensão tangencial crítica no fundo.

De seguida, expõem-se três propostas de autores distintos para a definição da velocidade de queda, apresentadas em Soulsby (1997). Como também se pode verificar pela visualização da figura 4.2, as três expressões aproximam-se, não se registando diferenças superiores a cerca de 15% entre as soluções obtidas.

Hallermeier (1981):

$$\begin{aligned}
 \omega_s &= \frac{\nu D_*^3}{18 d_{50}} & \text{para } D_*^3 \leq 39 \\
 \omega_s &= \nu \frac{D_*^{2.1}}{6 d_{50}} & \text{para } 39 < D_*^3 < 10^4 \\
 \omega_s &= \frac{1.05 \nu D_*^{1.5}}{d_{50}} & \text{para } 10^4 \leq D_*^3 \leq 10^6
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Rijn (1984):

$$\begin{aligned}
 \omega_s &= \frac{\nu D_*^3}{18 d_{50}} & \text{para } D_*^3 \leq 16.187 \\
 \omega_s &= \frac{10 \nu}{d_{50}} \left[ \left( 1 + 0.01 D_*^3 \right)^{0.5} - 1 \right] & \text{para } 16.187 < D_*^3 \leq 16187 \\
 \omega_s &= \frac{1.1 \nu D_*^{1.5}}{d_{50}} & \text{para } D_*^3 > 16187
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Soulsby (1997):

$$\omega_s = \frac{\nu}{d_{50}} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049 D_*^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad \text{para qualquer } D_* \tag{4.11}$$

Estas propostas desprezam o efeito da concentração de sedimentos na velocidade de queda. A expressão sugerida por Soulsby pode ser afectada de um coeficiente que entra em conta com a concentração de sedimentos ( $c$ ). A expressão da velocidade de sedimentação passaria a ser:

$$\omega_{s,c} = \frac{\nu}{d_{50}} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049 (1-c)^{4.7} D_*^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \tag{4.12}$$

Pela expressão, para volumes de concentração de sedimentos inferiores a 0.05 verifica-se que o efeito da concentração de sedimentos é pequeno, e na prática concentrações superiores a 0.05 só ocorrem em finas camadas de milímetros acima do fundo.

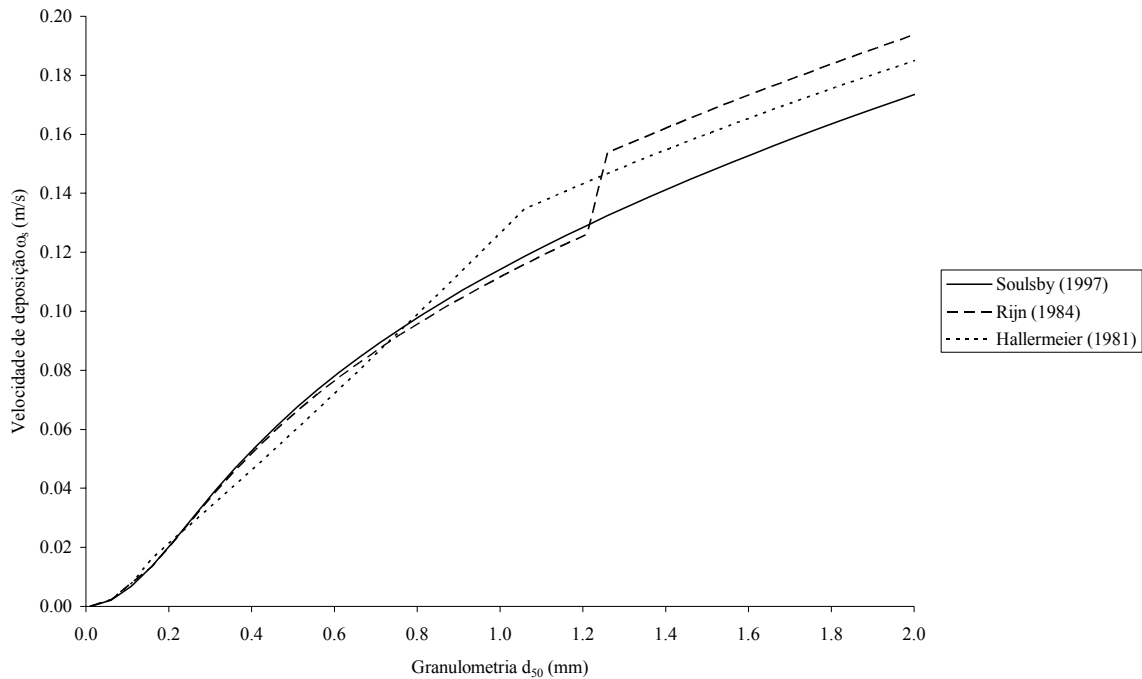


Figura 4.2: Velocidade de queda de partículas em suspensão.

Como já foi referido, o valor admitido para a velocidade de queda dos sedimentos é importante nos resultados obtidos para a carga de transporte de materiais em suspensão. A concentração de sedimentos em profundidade é proporcional à velocidade de queda das partículas.

Para praias dominadas pela acção das ondas e com pequenas marés, Gourlay (1968) combinou três parâmetros, correspondendo à altura de onda na rebentação ( $H_b$ ) e respectivo período de onda ( $T_b$ ) e a velocidade de queda dos sedimentos, definindo a velocidade de queda adimensional. A velocidade de queda adimensional é obtida pela expressão seguinte (Short, 1999):

$$\Omega = \frac{H_b}{\omega_s T_b} \quad (4.13)$$

A classificação do comportamento da praia em função da velocidade de queda adimensional foi proposta por Wright e Short (1984) para praias naturais, baseados em diversas observações da costa Sudoeste australiana e está expressa na tabela 4.1 (Short, 1999).

Como se pode verificar pelo gráfico seguinte, onde se representa a variação do parâmetro adimensional de velocidade de queda em função do diâmetro médio dos sedimentos da praia, para diversas alturas de onda na rebentação, as praias da costa Oeste portuguesa poderão, na

generalidade, ser classificadas de intermédias, quanto ao tipo de praia dominada pela acção das ondas. Para a representação apresentada foi considerada uma relação entre a altura de onda e o respectivo período correspondente à expressão 3.1.

Tabela 4.1: Classificação das praias em função da velocidade de queda adimensional.

Critério	Classificação	Características
$\Omega < 1$	praias reflectivas	inclinadas e sem barras
$\Omega 2-5$	praias intermédias	com uma a duas barras
$\Omega > 6$	praias dissipativas	planas e com múltiplas barras

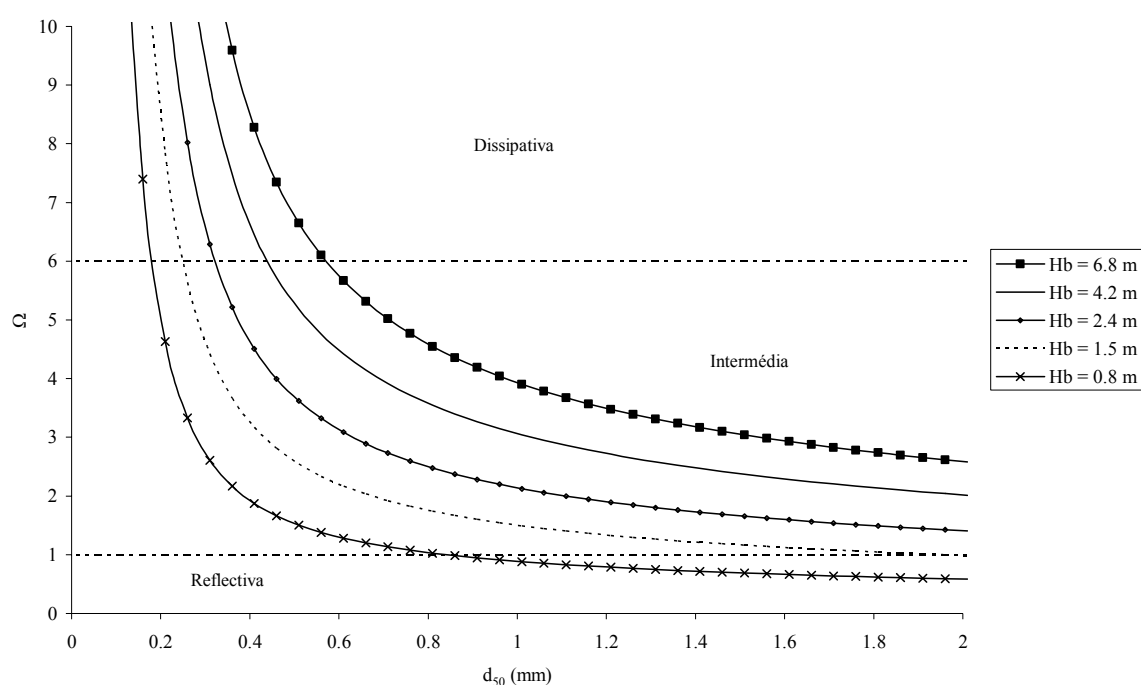


Figura 4.3: Classificação das praias em função da velocidade de queda adimensional.

A praia toma um comportamento dissipativo em períodos de temporal, enquanto em períodos de calma (ondas de menor altura) a praia passa a ser mais reflectiva.

Ainda segundo Short (1999), a classificação da praia pode ser feita em função de outras características da praia, como por exemplo, em função da inclinação.



#### 4.1.4 Parâmetro Adimensional de Shields

O parâmetro de Shields ( $\theta_{cr}$ ) é um parâmetro adimensional que relaciona a tensão tangencial com a força para mover os sedimentos do fundo. A expressão 4.14 traduz a sua definição, mas não permite a quantificação do seu valor, pois na prática usual de cálculo não se dispõe do valor da tensão tangencial crítica no fundo ( $\tau_{cr}$ ) antes do conhecimento deste parâmetro.

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d_{50}} \quad (4.14)$$

Shields traçou uma curva sobre uma nuvem correspondente a uma diversidade de pontos disponíveis em 1930 para a situação de início de movimento dos grãos originados por correntes. Soulsby e Whitehouse (1997) propõem a expressão algébrica 4.15, que se aproxima do traçado de Shields e é função do parâmetro adimensional de dimensão dos grãos. No entanto, essencialmente para baixos valores de  $D_*$  não existia uma boa concordância de valores e como Bagnold, por considerações de forças concluiu que o parâmetro de Shields não pode exceder o valor de 0.30, surge uma segunda proposta de Soulsby e Whitehouse (1997), com bons resultados medidos para ondas, correntes e acção simultânea de ambas (Soulsby, 1997). A equação melhorada é a 4.16 e a figura 4.4 mostra como estas duas expressões variam em função das características da granulometria (areias de quartzo e água do mar a 10 °C e salinidade de 35 partes por mil).

$$\theta_{cr} = \frac{0.24}{D_*} + 0.055(1 - e^{-0.020 D_*}) \quad (4.15)$$

$$\theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2 D_*} + 0.055(1 - e^{-0.020 D_*}) \quad (4.16)$$

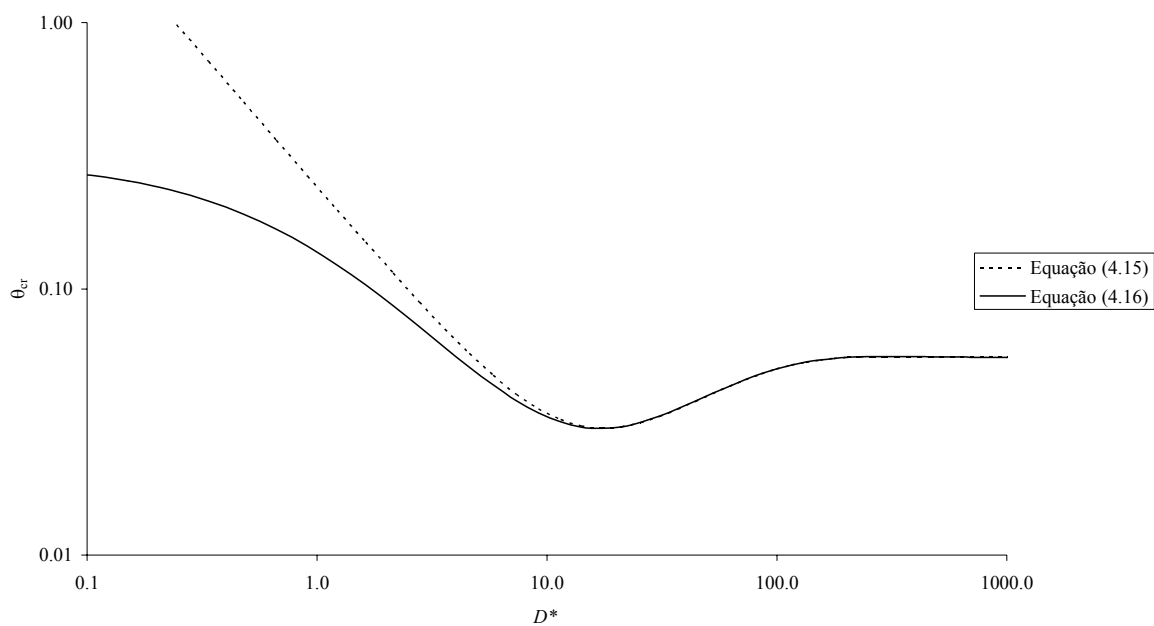


Figura 4.4: Parâmetro de Shields.

#### 4.1.5 Tensão Tangencial Crítica Junto ao Fundo

A tensão tangencial crítica no fundo é directamente proporcional ao parâmetro de Shields e depende também das características da granulometria dos sedimentos, aceleração da gravidade e massa volúmica dos sedimentos e fluido. Assim, esta grandeza é também característica do meio em análise. Da expressão 4.14 se retira a relação 4.17:

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho) g d_{50} \theta_{cr} \quad (4.17)$$

Esta tensão indica qual o valor de tensão tangencial, a partir da qual passa a haver instabilidade dos grãos do fundo. Para uma determinada condição de escoamento de ondas e correntes (tensão crítica conhecida) é também possível saber qual a dimensão de grãos a partir da qual não há instabilidade. Este aspecto é importante na determinação da granulometria do material a colocar em determinadas situações de intervenção para protecção.

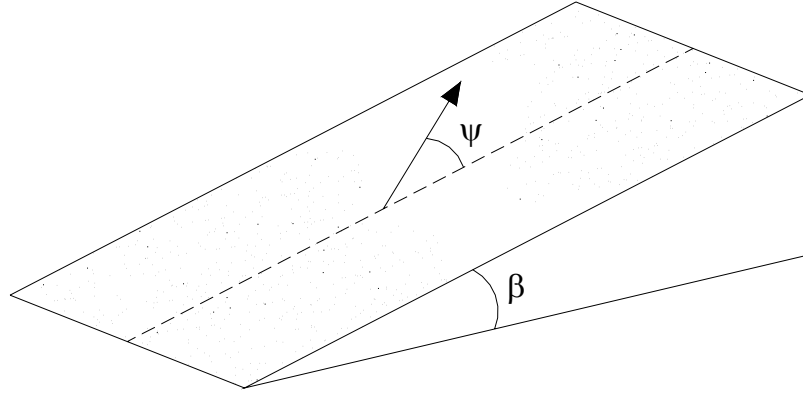


Figura 4.5: Escoamento com um ângulo  $\psi$  em relação ao fundo inclinado de um ângulo  $\beta$ .

$$\frac{\tau_{\beta cr}}{\tau_{cr}} = \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \phi - \sin^2 \phi \sin^2 \beta}}{\tan \phi} \quad (4.18)$$

A noção de fundos inclinados ( $\beta$ ) e do ângulo entre a direcção do escoamento e a do fundo ( $\psi$ ) é visível na figura 4.5, alterando a tensão tangencial crítica a considerar.

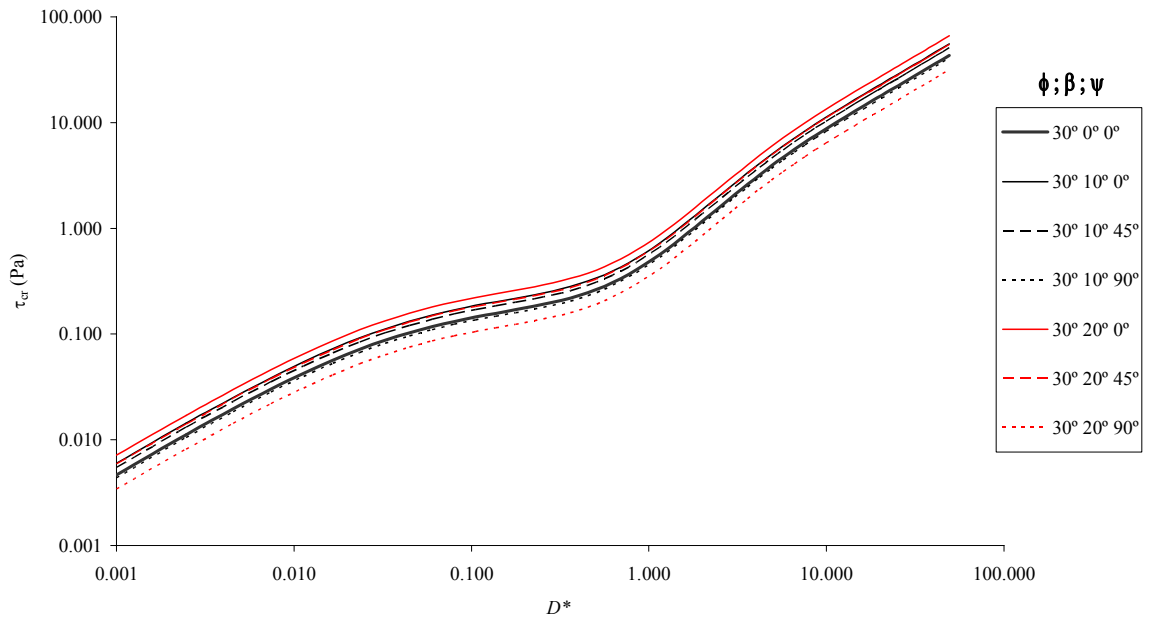


Figura 4.6: Tensão tangencial crítica.

No gráfico da figura 4.6 é representada numa escala logarítmica, a análise da relação 4.18 para um ângulo de atrito das areias ( $\phi$ ) de  $30^\circ$  e para algumas hipóteses de ângulos  $\beta$  ( $10^\circ$  e  $20^\circ$ ) e  $\psi$  ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ). As características de sedimentos e da água são as já adoptadas nos exemplos anteriores.

Obtêm-se tensões tangenciais críticas  $\tau_{\beta cr}$  com diferenças significativas sobre as tensões que resultam da equação 4.17, com registo para acréscimos em cerca de 53% ( $\beta = 20^\circ$  e  $\psi = 0^\circ$ ) a decréscimos de 27% ( $\beta = 20^\circ$  e  $\psi = 90^\circ$ ).

## 4.2 Processos de Transporte Sólido Longitudinal

Quando as ondas se aproximam obliquamente da costa são geradas correntes longitudinais (deriva litoral) que, juntamente com as ondas, são capazes de transportar avultadas quantidades de sedimentos (Fredse e Deigaard, 1992). Isto deve-se a dois mecanismos: o arrastamento pelas correntes na zona próxima da praia e o transporte na zona de rebentação das ondas (figura 4.7).

A acção das ondas incidentes movimenta a areia ao longo da praia, na direcção da onda. Quando há o retorno ou refluxo, a água e os sedimentos são arrastados na direcção de maior inclinação, perpendicular à praia. Este processo é no entanto difícil de traduzir em volume de areia transportada.

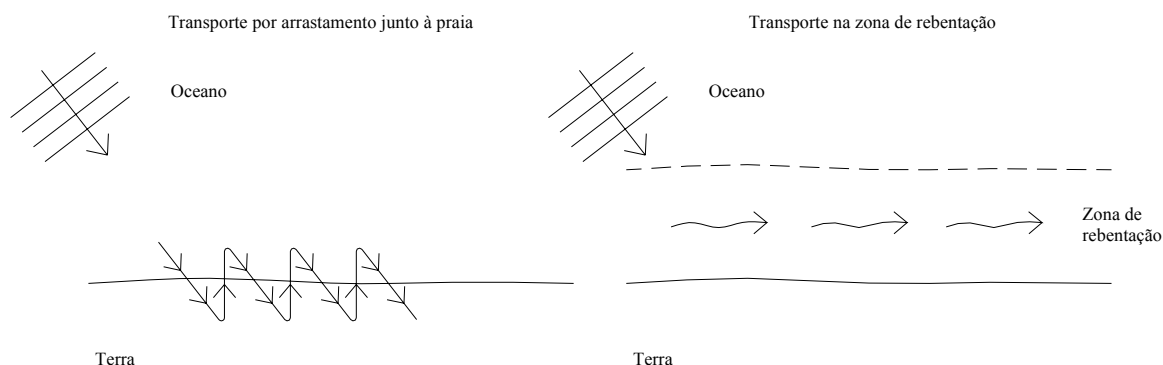


Figura 4.7: Processos de transporte longitudinal.

A turbulência na zona de rebentação coloca os sedimentos em suspensão, os quais podem ser transportados pelas correntes longitudinais geradas na rebentação das ondas. Juntamente com os sedimentos em suspensão, são transportados sedimentos junto ao fundo. A quantificação desta parcela é também difícil (Kamphuis, 2000).

#### 4.2.1 Aspectos Físicos e Sedimentológicos

Com base numa análise da situação actual do conhecimento, comenta-se em seguida a diversidade de variáveis envolvidas e formulam-se algumas das diferentes propostas de métodos que existem, bem como os resultados a que conduzem. Note-se que muito do trabalho que existe surge de adaptações das soluções encontradas para o transporte sedimentar em rios. Verifica-se que a principal diferença para estes é que no mar há predominância da acção das ondas. O transporte sedimentar na costa pode ser dividido em transporte originado pela acção das ondas (agitação) e transporte pelas correntes (por exemplo, originadas pelas marés). Em cada uma destas divisões, existirá uma parcela de transporte de sedimentos em suspensão e outra de sedimentos arrastados junto ao fundo.

Outros modelos poderiam ser apresentados, mas considera-se como suficiente esta apresentação que permite constatar que o grau de incerteza dos resultados é muito grande. Utilizando um mesmo método com ligeiras diferenças nos parâmetros adoptados, os resultados de deriva litoral são diferentes. Quando, com os mesmos pressupostos se opta por outro método, as diferenças são também muito significativas. Apesar da apresentação deste capítulo pretender ser generalista, os exemplos e comparações de cálculo que se expõem mostram-se adequados à situação da costa ocidental portuguesa. Como tal, analisa-se apenas a hipótese de sedimentos não coesivos (areias).

Alguns autores com publicações relacionadas a este tema do transporte sedimentar longitudinal nos últimos anos são Sleath em 1984, Dyer em 1986, Fredsøe e Deigaard (1992), Nielsen em 1992, Rijn em 1993 e Soulsby (1997).

Aqui, além dos parâmetros físicos já apresentados, interessa caracterizar mais algumas grandezas que permitem a percepção do fenómeno de transporte longitudinal e a incerteza a ele associada.

Em alguns dos modelos a referir é necessário adoptar uma profundidade de água  $h$  para o cálculo. A profundidade de água a considerar deverá normalmente ser um “valor médio” na largura da faixa costeira em análise. Caso na faixa em análise exista uma pendente do fundo (ângulo  $\beta$  da figura 4.5), essa pendente irá influenciar alguns dos parâmetros de cálculo, pelo que, além da consideração de uma profundidade média deverá ser cuidadosa a definição de outros parâmetros.

A oscilação do nível da água do mar entre marés vai influenciar também o valor a adoptar. Como foi visto, a variação entre os valores de preia-mar e baixa-mar em período de marés vivas pode

aproximar-se de 4 m na costa portuguesa. A profundidade da água é pois um parâmetro cuja definição está sujeita a alguma incerteza.

Ao longo da coluna de água, as características de concentração de sedimentos vão variando (figura 4.8). Para que seja possível avaliar uma concentração admissível de sedimentos é necessário definir uma altura considerada de referência, em que se admite nula a variação da concentração de sedimentos. Soulsby (1997) refere um estudo de Garcia e Parker de 1991 onde foram testadas sete propostas de definição da concentração de referência e o respectivo nível de referência. Como indicação de bons resultados, referem-se os nomes de Smith e McLean em 1977 e Zyserman e Fredsøe em 1994. Apresenta-se a proposta de Rijn (1984), onde  $T'$  é um parâmetro adimensional de excesso de tensões tangenciais no fundo, definido mais à frente, durante a apresentação do modelo de transporte de Rijn.

$$c_a = 0.015 \frac{d_{50}}{a} \frac{T'^{1.5}}{D_*^{0.30}} \quad (4.19)$$

Esta concentração de sedimentos  $c_a$  (relação entre volumes) será constante até à altura  $a$ , cuja definição também é variável segundo diversos autores. Para pequenas profundidades, a forma do fundo é importante e condiciona o nível de referência, resultando valores diferentes para fundos lisos, com rugas ou em forma de dunas. Os fundos lisos ocorrem para altas velocidades de corrente em águas pouco profundas ou então sob acção intensa das ondas. Segundo Soulsby (1997), para a altura das formas do fundo ( $\Delta$  na figura 4.8) deverão ser adoptados os seguintes valores, propostos por Rijn (1984):

Fundos com rugas:

$$\Delta = \frac{\lambda}{7} \quad (4.20)$$

com  $\lambda$  a representar o comprimento do ondulado (rugosidade dos fundos) e pode ser obtido pela expressão 4.21:

$$\lambda = 1000 d_{50} \quad (4.21)$$

Fundos em forma de duna:

$$\Delta = 0.11h \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{0.3} (1 - e^{-0.5T_s})(25 - T_s) \quad (4.22)$$

Esta expressão só é válida se for respeitada a condição 4.23 de relação entre a tensão tangencial efectiva no fundo devido aos grãos ( $\tau_{0s}$ ) e a tensão tangencial crítica no fundo ( $\tau_{cr}$ ):

$$\tau_{cr} < \tau_{0s} < 26 \tau_{cr} \quad (4.23)$$

A equação 4.24 permite o cálculo da altura do nível de referência em função de  $\Delta$ . Realça-se que Rijn refere que o valor de  $a$  não deve ser considerado inferior a 1% da profundidade, pelo que, quando da relação com  $\Delta$  resultarem valores menores, deverá ser adoptado o valor mínimo.

$$a = 0.5 \Delta \geq 0.01 h \quad (4.24)$$

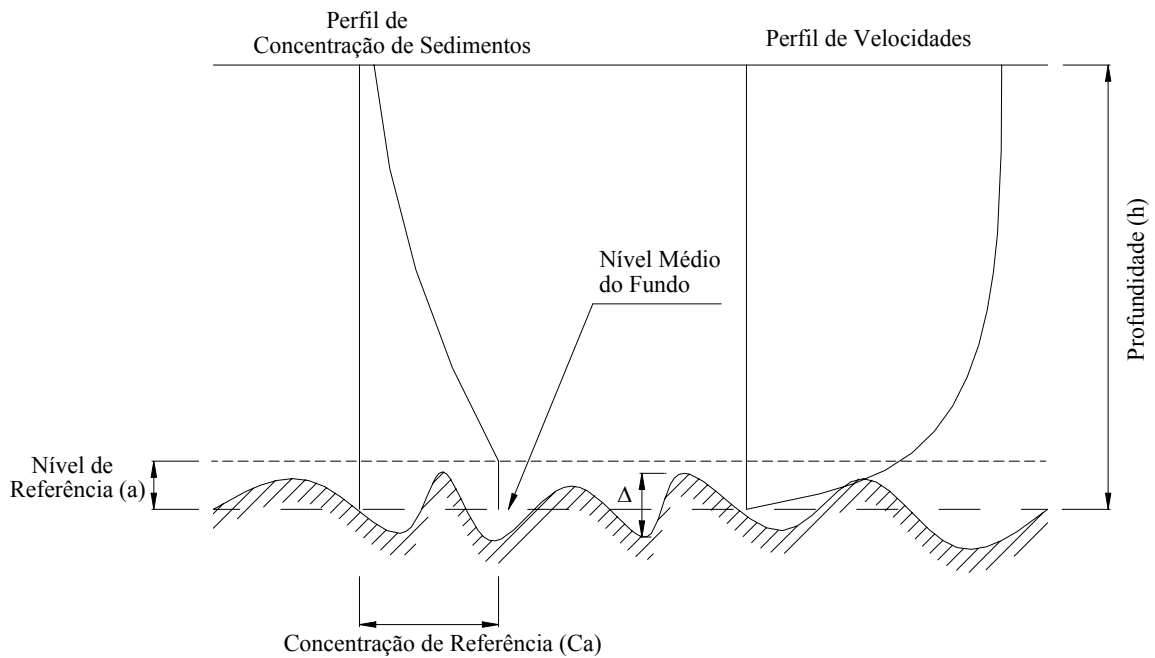


Figura 4.8: Esquema da variação de concentração de sedimentos e das velocidades em profundidade (adaptado de Rijn, 1989).

Para ter noção da importância da profundidade na avaliação do transporte sólido longitudinal, refere-se que para as mesmas condições de agitação marítima, a zonas mais profundas corresponde

uma menor carga sedimentar transportada. A redução da profundidade provoca um aumento exponencial dos sedimentos transportados, pelo que é fundamental uma boa definição da profundidade essencialmente em situações de águas pouco profundas.

A velocidade de corrente ao longo da coluna de água é variável e pode ser esquematizada segundo o perfil logarítmico que se visualiza na figura 4.8. Para a resolução dos problemas relacionados com a deriva litoral é importante definir o valor médio em profundidade ( $u_c$ ). Este parâmetro entra como um dado na generalidade dos problemas de transporte sólido longitudinal.

A tensão tangencial no fundo surge da acção das forças hidrodinâmicas de fricção, exercidas pela corrente sobre o fundo. Esta tensão pode ser expressa pela velocidade de fricção da corrente junto ao fundo ( $u_*$ ), valor de importância na resolução destes problemas, pelo que se apresenta a definição pela equação 4.25.

$$u_* = \left( \frac{\bar{\tau}_c'}{\rho} \right)^{0.5} \quad (4.25)$$

Associada à velocidade da corrente está também a definição da direcção. A direcção da corrente é variável ao longo do tempo, pelo que, na análise da velocidade de corrente deverão ser adoptados valores em correspondência com a frequência de registos, de acordo com o histórico da área em análise.

Como já foi referido anteriormente, a altura de uma onda vai variando ao longo do tempo. Assim, o procedimento habitual é de realizar a análise de um histórico de valores de alturas de onda num dado local e em função desses registos trabalhar um valor específico, normalmente correspondente a um valor da altura de onda significativa.

A maior contribuição para o processo de transporte sedimentar advém das ondas mais altas, pelo que se define altura de onda significativa ( $H_S$ ), como a média do terço de registo de alturas de onda mais elevados (Soulsby, 1997).

Associada à onda e à sua altura, está a direcção ou rumo com que esta se propaga, que naturalmente é variável no tempo. Assim, é também necessário recorrer às frequências de registos e considerar para cada direcção, as alturas de onda significativas. Segundo Soulsby (1997), a obtenção dos valores das alturas de onda já inclui um erro de medição de cerca de 10%, enquanto que para a



medição da direcção das ondas o erro pode chegar a 15%. É óbvio que registos passados não garantem frequências e grandeza de ocorrências futuras. Existe pois um grau de incerteza relativamente grande.

As ondas vão gerar velocidades no meio fluido, surgindo o conceito de velocidade orbital da onda, que actua sobre os sedimentos, junto à camada de fundo. Esta velocidade é oscilatória e tem particular relevo quando as ondas actuam em águas pouco profundas (onde a acção da onda é significativa no transporte junto ao fundo), ou seja, para alturas de onda significativa superiores a um décimo da profundidade. A velocidade orbital tenderá a ser nula para águas profundas.

$$U_w = \frac{2\pi}{T} A_w \quad (4.26)$$

Na expressão 4.26, a velocidade orbital da onda ( $U_w$ ) está dependente da amplitude de pico da onda ( $A_w$ ) dado pela equação 4.27 e do período de onda ( $T$ ), analisado mais à frente.

$$A_w = \frac{H_s}{2 \sinh(k h)} \quad (4.27)$$

Nesta última expressão, a  $k$  corresponde o número de onda ( $2\pi/L$ ).

Por fim, e ainda associado a estes conceitos relacionados com as ondas, surge a noção de espessura da camada limite de onda, com a qual é possível definir a altura da camada junto ao fundo onde é praticamente constante o coeficiente de mistura de sedimentos, quando o fundo é plano. A espessura da camada limite de onda ( $\delta_w$ ) é:

$$\delta_w = 0.072 A_w \left( \frac{A_w}{3 d_{90}} \right)^{-0.25} \quad (4.28)$$

O denominador da fracção na expressão apresentada corresponde a uma proposta de Rijn para a definição da rugosidade das partículas do fundo.

O período de onda é outro dos parâmetros a considerar na problemática dos fenómenos de transporte sedimentar. Tal como para a altura de onda, podem ser trabalhados diversos valores de

período de onda, sendo corrente a utilização do período de pico. À medição do período de onda está associado um erro de cerca de 10% (Soulsby, 1997).

Por vezes podem não existir registos dos valores do período de onda, pelo que é necessário recorrer a expressões empíricas entre a altura de onda significativa e o respectivo período. Como se verificou, em geral, o período aumenta com o aumento da altura das ondas.

Essencialmente para trabalhos experimentais de laboratório, a geração das ondas poderá obedecer a uma frequência regular (e por consequência, também período regular), sendo criadas ondas segundo um espectro designado de monocromático. A geração experimental de ondas aleatórias também poderá ser feita por imposição de um espectro de frequência, como por exemplo, o espectro de JONSWAP, um espectro empírico obtido com base num largo número de medição de ondas do mar do Norte.

O comprimento de onda ao largo ( $L_0$ ) é determinado em função do período de onda:

$$L_0 = \frac{g T^2}{2\pi} \quad (4.29)$$

A partir do momento que as ondas interagem com os fundos, o comprimento de onda passa a ser variável. O comprimento de onda ( $L$ ) nesse caso pode ser obtido pela expressão:

$$L = \frac{2\pi}{k} \quad (4.30)$$

onde  $k$  é o número de onda. A determinação do número de onda ou do comprimento de onda não é fácil, pois o que é normalmente conhecido é o período de onda. Apresenta-se nas equações 4.31 a 4.33 a proposta de Rijn para o cálculo de  $k$ . Nas figuras 4.9 e 4.10 comparam-se os resultados do comprimento de onda segundo a metodologia de Rijn e a de G. Gilbert. Estes conduzem a ligeiras diferenças de valores. Nestes gráficos, são ainda comparados os resultados do comprimento de onda obtido para águas profundas (só dependentes do período) e pouco profundas (dependentes do período e da profundidade).

$$k = \frac{\sqrt{y^2 + \frac{y}{p}}}{h} \quad (4.31)$$

em que  $y$  e  $p$  se obtêm de acordo com as expressões 4.32 e 4.33.

$$y = \frac{4.02 h}{T^2} \quad (4.32)$$

$$p = 1 + y(0.666 + y(0.355 + y(0.161 + y(0.063 + y(0.022 + 0.00654 y)))) \quad (4.33)$$

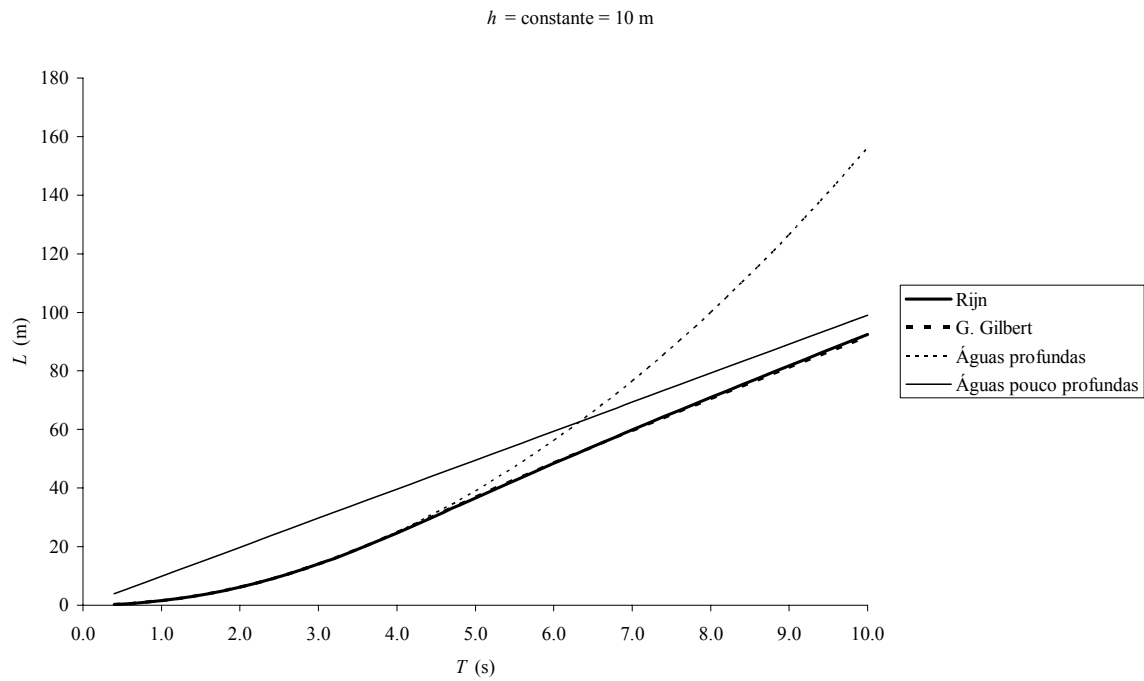


Figura 4.9: Variação do comprimento de onda em função do período, para profundidade constante.

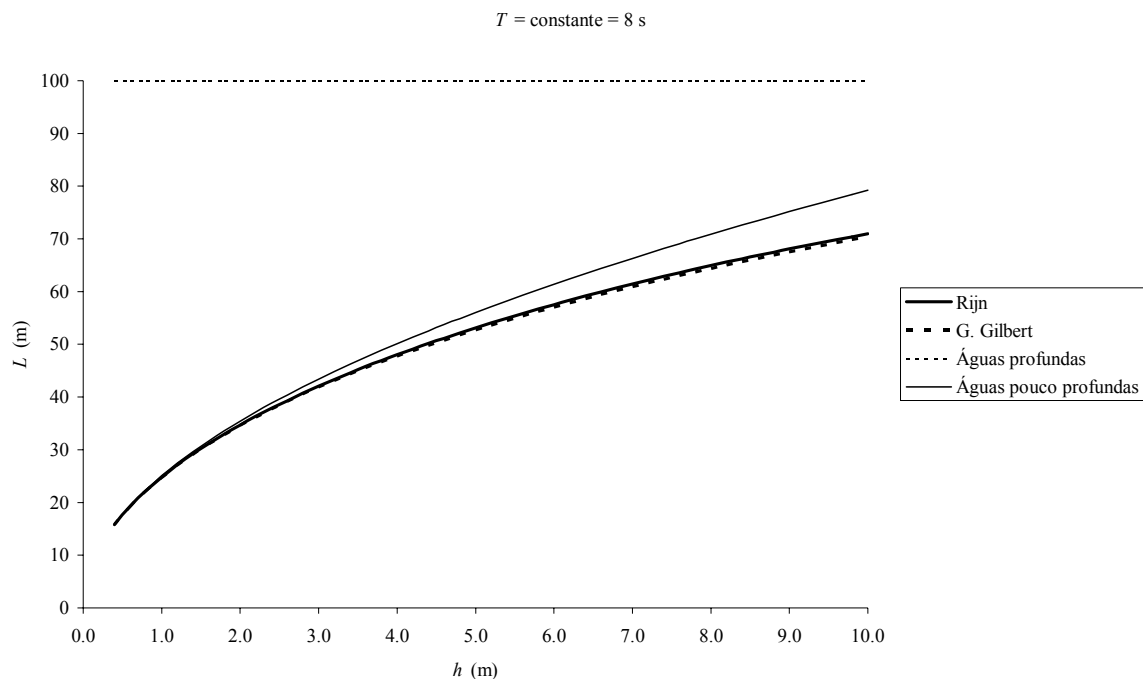


Figura 4.10: Variação do comprimento de onda em função da profundidade, para período constante.

## 4.2.2 Transporte por Correntes Junto ao Fundo

Inicia-se aqui a apresentação de modelos de cálculo da quantidade de sedimentos em transporte. Nesta secção considera-se apenas o transporte por correntes junto ao fundo, bastante similar ao processo de transporte em rios e por isso, com estudos e comportamentos melhor caracterizados.

### 4.2.2.1 Modelo de Meyer-Peter e Müller (1948)

Meyer-Peter e Müller (1948) realizaram um extenso trabalho experimental em laboratório. As experiências foram realizadas num canal de secção de  $2 \times 2 \text{ m}^2$  e 50 m de comprimento, utilizando material uniforme para o fundo, bem como misturas de partículas (Rijn, 1989). Concluíram que a expressão que melhor permite o cálculo da carga transportada é:

$$q_{b,c} = 8[(s-1)g]^{0.5} d_{50}^{1.5} (\mu\theta - 0.047)^{1.5} \quad (4.34)$$

onde  $\mu$  é um factor de forma do fundo que se expressa de acordo com a relação 4.35 e que depende dos coeficientes de Chézy. Estes tomam os valores das equações 4.36 e 4.37.

$$\mu = \left( \frac{C}{C'} \right)^{1.5} \quad (4.35)$$

$$C = 18 \log \left( \frac{12h}{k_{s,c}} \right) \quad (4.36)$$

$$C' = 18 \log \left( \frac{12h}{d_{90}} \right) \quad (4.37)$$

$\theta$  é um parâmetro da mobilidade efectiva das partículas, semelhante ao parâmetro crítico apresentado na equação 4.14. A diferença surge na consideração da tensão tangencial efectiva relativa a correntes como numerador da equação, ao contrário da tensão expressa na referida equação, onde é a tensão tangencial crítica no fundo que é considerada.

$$\theta = \frac{\bar{\tau}_c'}{(\rho_s - \rho)g d_{50}} \quad (4.38)$$

Na expressão 4.36 surge a necessidade de definir a rugosidade relativa das partículas do fundo, no que respeita ao efeito das correntes ( $k_{s,c}$ ). Há várias propostas de utilização de valores para  $k_{s,c}$ , mas a mais utilizada é:

$$k_{s,c} = 2.5 d_{50} \quad (4.39)$$

Soulsby (1997) refere que Sleath em 1984 e Rijn em 1993 apresentam diferentes propostas em função de percentis do tamanho dos sedimentos e da forma do fundo que conduzem a resultados bastante afastados. Esta incerteza conduz também a incerteza nos resultados das tensões tangenciais, mas com bastante menor significado devido à relação logarítmica com  $k_{s,c}$ .

#### 4.2.2.2 Modelo de Frijlink (1952)

Devido à sua simplicidade, apresenta-se também o modelo de cálculo do transporte da carga do fundo originado por correntes segundo a teoria de Frijlink. A expressão que permite a obtenção da carga transportada no fundo devido às correntes tem por base os mesmos conceitos da expressão anterior:

$$q_{b,c} = 5 \mu^{0.5} u_{*,c} d_{50} e^{\left(\frac{-0.27}{\mu \theta}\right)} \quad (4.40)$$

Além das grandezas já expostas, surge o conceito de velocidade de corrente tangente ao fundo, definido de acordo com 4.41.

$$u_{*,c} = \frac{g^{0.5} u_c}{C} \quad (4.41)$$

A expressão 4.40 não é mais do que o bom ajuste de uma curva a todos os dados existentes até à data em que foi proposta.

#### 4.2.2.3 Modelo de Bagnold (1966)

Bagnold (1966) introduziu o conceito de balanço de energia, relacionando o transporte de sedimentos no fundo com o trabalho realizado pelo fluido (Rijn, 1989). Segundo este autor, a carga transportada junto ao fundo poderá ser obtida por aplicação da expressão:

$$q_{b,c} = \frac{e_b}{(\rho_s - \rho)g(\tan \phi - \tan \beta)} \bar{\tau}_c u_c \quad (4.42)$$

$e_b$  é um factor de eficiência, cujo valor a adoptar deverá ser aproximadamente igual a 0.1.  $\phi$  é o ângulo de atrito do material do fundo, pelo que pode adoptar-se para  $\tan \phi$  um valor aproximado de 0.6, já que normalmente o ângulo de atrito dos sedimentos toma um valor próximo de 30°.  $\beta$  é o ângulo da inclinação do fundo. A tensão tangencial no fundo devida a correntes é expressa pela equação 4.43, em função do coeficiente  $f_a$  e por via indirecta, da rugosidade aparente  $k_a$ .

$$\bar{\tau}_c = 0.125 \rho f_a u_c^2 \quad (4.43)$$

$$f_a = 0.24 \log^{-2} \left( \frac{12h}{k_a} \right) \quad (4.44)$$

Rijn (1989) define a rugosidade aparente ( $k_a$ ) em função de  $k_{s,c}$ , da velocidade de corrente e da velocidade orbital da onda. Assim, a rugosidade aparente reflecte o efeito conjunto da acção das ondas e correntes e associa ainda um coeficiente que relaciona o ângulo definido entre as ondas e a corrente. O quociente entre a velocidade orbital de onda e a velocidade de corrente não deverá ser considerado superior a 2.5 nestes cálculos.

$$k_a = k_{s,c} e^{\left( \gamma_{w,c} \frac{U_w}{u_c} \right)} \quad (4.45)$$

O factor  $\gamma_{w,c}$  é então um parâmetro de relação entre os ângulos de ondas e correntes. Se  $\phi_{w,c}$  for o ângulo definido pela direcção de propagação das ondas com a direcção da velocidade de corrente, então:

$$\begin{aligned} \gamma_{w,c} &= 0.75 & \text{para } 0^\circ < \phi_{w,c} \leq 90^\circ \\ \gamma_{w,c} &= 0.75 + \frac{\phi_{w,c} - 90^\circ}{90^\circ} & \text{para } 90^\circ < \phi_{w,c} \leq 180^\circ \end{aligned} \quad (4.46)$$

Como se verifica pela análise das expressões, apesar da tensão tangencial ser devida a correntes, acaba por estar relacionada com a velocidade orbital das ondas  $U_w$ , pelo que, a carga total transportada vai depender das características das ondas.

#### 4.2.3 Transporte Total Devido ao Efeito das Correntes

Os modelos de transporte sedimentar que se expõem de seguida, associam ao transporte junto ao fundo uma parcela correspondente a sedimentos em suspensão.

#### 4.2.3.1 Modelo de Bagnold (1966)

Mantendo o conceito de balanço de energia, Bagnold propôs um modelo de cálculo da carga em suspensão. Este autor sugere o cálculo independente da carga transportada junto ao fundo e da carga suspensa, e permite a soma das parcelas no cálculo total do transporte.

A carga transportada em suspensão pode ser obtida por aplicação da expressão 4.47, surgindo mais um factor de eficiência  $e_s$  que deve ser considerado próximo do valor 0.02.

$$q_{s,c} = \frac{e_s (1 - e_b)}{(\rho_s - \rho) g \left( \frac{\omega_s}{u_c} - \tan \beta \right)} \bar{\tau}_c u_c \quad (4.47)$$

A carga total transportada devido às correntes é segundo este autor a soma das duas parcelas atrás descritas. Como já se referiu, o resultado final dos cálculos a efectuar com este modelo vão também depender das características das ondas, por relação indirecta de parâmetros.

$$q_c = q_{b,c} + q_{s,c} \quad (4.48)$$

#### 4.2.3.2 Modelo de Engelund-Hansen (1967)

Este método é baseado em considerações de energia e calibrado com dados obtidos em cerca de cem experiências em canal (Rijn, 1989). O transporte total originado por correntes segundo a teoria de Engelund e Hansen (1967) é avaliado da equação 4.49, onde todas as grandezas intervenientes são já conhecidas. Assim:

$$q_c = \frac{0.05 u_c^5}{(s-1)^2 g^{0.5} d_{50} C^3} \quad (4.49)$$

#### 4.2.3.3 Modelo de Ackers-White (1973)

A fórmula empírica proposta por este método resume o resultado de 925 experiências de campo e em laboratório (Rijn, 1989). Para proceder ao cálculo do transporte sólido originado por correntes



segundo a teoria deste modelo, é necessário conhecer uma série de parâmetros, dependentes principalmente da granulometria dos sedimentos do fundo. A expressão que permite o cálculo da carga transportada é a 4.50.

$$q_c = k_1 u_c d_{35} \left( \frac{u_c}{u_{*,c}} \right)^{k_2} \left( \frac{k_4 - k_5}{k_5} \right)^{k_3} \quad (4.50)$$

Nesta expressão, os coeficientes  $k_i$  tomam os seguintes valores:

$$\begin{aligned} k_1 &= \exp[2.86 \ln D_* - 0.434 (\ln D_*)^2 - 8.13] & \text{se } D_* < 60 \\ k_1 &= 0.025 & \text{se } D_* \geq 60 \end{aligned} \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned} k_2 &= 1 - 0.56 \log D_* & \text{se } D_* < 60 \\ k_2 &= 0 & \text{se } D_* \geq 60 \end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} k_3 &= \frac{9.66}{D_*} + 1.34 & \text{se } D_* < 60 \\ k_3 &= 1.5 & \text{se } D_* \geq 60 \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$k_4 = \left( \frac{u_{*,c}^{k_2}}{((s-1)g d_{35})^{0.5}} \right) \left( \frac{u_c}{5.66 \log \left( \frac{10h}{d_{35}} \right)} \right)^{1-k_2} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned} k_5 &= \frac{0.23}{D_*^{0.5}} + 0.14 & \text{se } D_* < 60 \\ k_5 &= 0.17 & \text{se } D_* \geq 60 \end{aligned} \quad (4.55)$$

Note-se que nestas expressões, e ao contrário do que é referido no restante texto, o valor adimensional da dimensão das partículas é em função de  $d_{35}$ .

#### 4.2.4 Transporte Total Devido ao Efeito das Ondas e das Correntes

A ondulação sobre uma camada de areia é capaz de gerar a suspensão de sedimentos, com concentrações elevadas junto ao fundo. Este facto, conjugado com as correntes geradas por marés, ventos e ondas aumenta as concentrações de sedimentos em camadas superiores. Bijker foi dos primeiros a detalhar um método de cálculo das taxas de transporte por combinação dos efeitos de correntes e ondas (Rijn, 1989).

Métodos de previsão para computação integral da largura de transporte sedimentar longitudinal, baseados na componente longitudinal do fluxo de energia da onda na linha de rebentação foram propostos pela CERC e por Kamphuis e são apresentados noutra secção deste capítulo.

##### 4.2.4.1 Modelo de Rijn (1984)

Rijn (1989) apresenta um modelo de cálculo da carga transportada bastante elaborado, onde analisa por partes as diferentes parcelas intervenientes no processo. Aqui, procede-se apenas a uma apresentação sumária das expressões que influenciam o cálculo do transporte junto ao fundo (devido ao efeito de ondas e correntes) e do transporte em suspensão (também devido ao efeito de ondas e correntes). Para o cálculo da carga transportada em suspensão, este autor propõe uma solução numérica correspondente à área do produto do perfil de velocidades e do perfil de concentração de sedimentos (ver figura 4.8), ou uma solução aproximada do cálculo do integral correspondente ao perfil que resulta desse produto.

Para efectuar esses cálculos, são inicialmente definidos alguns conceitos a aplicar mais à frente. As ondas e correntes interagem entre si, sendo possível definir um coeficiente de interacção entre ondas e correntes de acordo com a expressão 4.56:

$$\alpha_{w,c} = \left[ \frac{\ln\left(\frac{30\delta_s}{k_a}\right)}{\ln\left(\frac{30\delta_s}{k_{s,c}}\right)} \right]^2 \quad \text{com } \alpha_{w,c} = 1 \quad \text{se } \delta_s \leq \frac{k_{s,c}}{10} \quad (4.56)$$

Nesta expressão,  $\delta_s$  é a espessura da camada de fundo com mistura constante de sedimentos, definida em função da espessura da camada de onda ( $\delta_w$ ). Valores comuns para esta grandeza serão

na ordem de 0.03 m a 0.1 m. Devido ao efeito da rebentação das ondas, quando esta existir, o valor de  $\delta_s$  pode aumentar para valores até cerca de 0.2 m.

$$\delta_s = 3 \delta_w \quad (4.57)$$

A carga transportada junto ao fundo pode calcular-se, após a determinação das tensões tangenciais efectivas no fundo devido a ondas e correntes.

Para a determinação das tensões no fundo devidas a ondas será necessário proceder à sequência de cálculo das fórmulas que se expõem. O factor de fricção devido à acção das ondas ( $f_w$ ) não deverá ser considerado superior a 0.30. A tensão tangencial no fundo devido às ondas segue a expressão 4.59. Pode definir-se um factor de eficiência  $\mu_w$ , resultando por fim a expressão 4.61 como a tensão tangencial efectiva no fundo devida à acção das ondas:

$$f_w = e^{\left[ -6 + 5.2 \left( \frac{A_w}{3 d_{90}} \right)^{-0.19} \right]} \quad (4.58)$$

$$\bar{\tau}_w = 0.25 \rho f_w U_w^2 \quad (4.59)$$

$$\mu_w = \frac{0.6}{D_*} \quad (4.60)$$

$$\bar{\tau}'_w = \mu_w \bar{\tau}_w \quad (4.61)$$

Para as correntes, o procedimento é análogo, sendo necessário obter dois factores de fricção:

$$f_c = 0.24 \log^{-2} \left( \frac{12 h}{k_{s,c}} \right) \quad (4.62)$$

$$f'_c = 0.24 \log^{-2} \left( \frac{12 h}{3 d_{90}} \right) \quad (4.63)$$

O factor de eficiência da acção das correntes resulta do quociente entre os factores definidos.

$$\mu_c = \frac{f'_c}{f_c} \quad (4.64)$$

Por fim, a tensão tangencial efectiva no fundo devida às correntes resulta do produto deste factor de eficiência, pelo coeficiente definido na equação 4.56 e pela tensão tangencial no fundo devida a correntes, calculada de acordo com o já descrito no ponto 4.2.2.3.

$$\bar{\tau}'_c = \mu_c \alpha_{w,c} \bar{\tau}_c \quad (4.65)$$

A tensão tangencial efectiva total no fundo resulta da soma dos efeitos de ondas e correntes:

$$\bar{\tau}'_{w,c} = \bar{\tau}'_w + \bar{\tau}'_c \quad (4.66)$$

Com esta tensão e o parâmetro adimensional de excesso de tensões tangenciais no fundo  $T'$  (deverá tomar um valor não inferior a 0.0001), pode-se aplicar a expressão 4.19 que define a concentração de sedimentos junto ao fundo ( $z < a$ ) e a expressão 4.25 que define a velocidade junto ao fundo. Para o cálculo de  $T'$ ,  $\theta$  é o parâmetro de mobilidade das partículas, novamente semelhante ao parâmetro crítico apresentado na equação 4.14, mas agora referido à tensão tangencial efectiva total no fundo.

$$T' = \frac{\theta - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (4.67)$$

A carga transportada junto ao fundo pela acção simultânea de ondas e correntes será:

$$q_b = 0.25 u_* d_{50} \frac{T'^{1.5}}{D_*^{0.3}} \rho_s \quad (4.68)$$

A parcela correspondente ao transporte em suspensão subdivide-se em duas partes. Analisa-se primeiro a originada pelas ondas, definindo-se uma distribuição de mistura de sedimentos em função da profundidade. O coeficiente  $\alpha_{br}$  deverá ser sempre igual ou superior à unidade.

$$\alpha_{br} = \frac{3 H_s}{h} - 0.8 \quad (4.69)$$

$$\varepsilon_{s,bed} = 0.004 D_* \alpha_{br} \delta_s U_w \quad (4.70)$$

$$\varepsilon_{s,max} = 0.035 \alpha_{br} h \frac{H_s}{T} \quad (4.71)$$

O coeficiente de distribuição da mistura de sedimentos relativo a ondas ( $\varepsilon_{s,w}$ ) terá então a seguinte variação em profundidade:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{s,w} &= \varepsilon_{s,bed} & z &\leq \delta_s \\ \varepsilon_{s,w} &= \varepsilon_{s,bed} + (\varepsilon_{s,max} - \varepsilon_{s,bed}) \frac{z - \delta_s}{0.5h - \delta_s} & \delta_s < z < 0.5h \\ \varepsilon_{s,w} &= \varepsilon_{s,max} & z &\geq 0.5h \end{aligned} \quad (4.72)$$

De modo análogo, para as correntes é também possível definir a distribuição de sedimentos em profundidade, em função dos valores retirados das equações 4.73 e 4.74, onde  $\kappa$  representa a constante de Von Karman, que deve tomar o valor de 0.40.

$$u_{*,c} = \frac{g^{0.5} u_c}{C} \quad (4.73)$$

$$\varepsilon_{s,max} = 0.25 \kappa u_{*,c} h \beta_1 \quad (4.74)$$

O factor  $\beta_1$  descreve a diferença de difusão das partículas no fluido e das partículas isoladas e assume-se constante em profundidade. Utilizando os estudos efectuados por Coleman em 1970, para o coeficiente de mistura de sedimentos em profundidade, Rijn chegou à definição de  $\beta_1$ , expresso da seguinte forma:

$$\beta_1 = 1 + 2 \left( \frac{\omega_s}{u_{*,c}} \right)^2 \quad \text{para} \quad 0.1 < \left( \frac{\omega_s}{u_{*,c}} \right) < 1 \quad (4.75)$$

Este factor também vai intervir no cálculo da carga transportada em suspensão por aplicação da fórmula, sendo inversamente proporcional ao número de suspensão relacionado com correntes. Refere-se, no entanto que não deve ser adoptado em nenhuma situação um valor superior a dois, porque a este parâmetro está ainda associada uma grande incerteza. Fazendo variar este factor entre

1 e 2, os resultados da carga transportada em suspensão variam significativamente, chegando a diferenças na ordem de 5 vezes, quando a acção das ondas é pequena ou nula.

O coeficiente de distribuição da mistura de sedimentos relativo a correntes ( $\varepsilon_{s,c}$ ) varia em profundidade de acordo com 4.76:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{s,c} &= \varepsilon_{s,\max} - \varepsilon_{s,\max} \left(1 - \frac{2z}{h}\right)^2 & z < 0.5h \\ \varepsilon_{s,c} &= \varepsilon_{s,\max} & z \geq 0.5h\end{aligned}\quad (4.76)$$

Por fim, o coeficiente de distribuição da mistura de sedimentos em profundidade, por acção simultânea de ondas e correntes corresponde ao valor  $\varepsilon_{s,cw}$  e é expresso em  $m^2/s$ .

$$\varepsilon_{s,cw} = \sqrt{\varepsilon_{s,w}^2 + \varepsilon_{s,c}^2} \quad (4.77)$$

Conhecendo a concentração de sedimentos junto ao fundo  $c_a$ , e a variação da concentração em profundidade, agora definida, na posse do valor da velocidade de queda das partículas pode-se definir o gradiente da concentração de sedimentos em profundidade para as zonas fora da proximidade do fundo ( $z > a$ ). Esta expressão corresponde portanto ao perfil de concentração de sedimentos apresentado na figura 4.8.

$$\frac{dc_z}{dz} = - \frac{\omega_s c_a (1 - c_a)^5}{\varepsilon_{s,cw}} \quad (4.78)$$

Com a velocidade de corrente à cota  $\delta_s$ , de acordo com a equação 4.79, Rijn (1989) define também uma distribuição de velocidades em profundidade. Esta, também corresponde ao perfil de velocidades apresentado na figura 4.8.

$$u_\delta = \frac{u_c \ln\left(\frac{30\delta_s}{k_a}\right)}{-1 + \ln\left(\frac{30h}{k_a}\right)} \quad (4.79)$$

O perfil de velocidades divide-se em duas zonas distintas:

$$u_{c,z} = \frac{u_\delta \ln\left(\frac{30z}{k_{s,c}}\right)}{\ln\left(\frac{30\delta_s}{k_{s,c}}\right)} \quad \text{dentro da camada limite da onda } (z < \delta_s)$$

$$u_{c,z} = \frac{u_c \ln\left(\frac{30z}{k_a}\right)}{-1 + \ln\left(\frac{30h}{k_a}\right)} \quad \text{fora da camada limite da onda } (z > \delta_s) \quad (4.80)$$

Como foi já referido atrás, a carga transportada em suspensão corresponde à área definida graficamente pelo produto de velocidades e concentração de sedimentos em profundidade. A tradução matemática deste enunciado é apresentada na forma do integral da equação 4.81:

$$q_s = \int_a^h u_{c,z} c_z dz \quad (4.81)$$

Rijn (1989) propõe duas alternativas para resolver o integral, obtendo resultados algo afastados. A primeira é a solução numérica correspondente à soma das áreas do gráfico do produto das velocidades pelas concentrações. A segunda expõe-se de seguida e corresponde a uma solução aproximada do cálculo do integral, em função das expressões e parâmetros seguintes:

$$\alpha_1 = 7 \quad \text{se } \frac{h}{\delta_s} \leq 100$$

$$\alpha_1 = 0.7 \left( \frac{h}{\delta_s} \right)^{0.5} \quad \text{se } \frac{h}{\delta_s} > 100 \quad (4.82)$$

É definido um número de suspensão relacionado com ondas ( $ZW$ ) e um número de suspensão relacionado com correntes ( $ZC$ ). Qualquer destes números não deve ser considerado superior a 25:

$$ZW = \alpha_1 \left( \frac{\omega_s}{u_c} \right)^{0.9} \left( \frac{u_c T}{H_s} \right)^{1.05} \quad (4.83)$$

$$ZC = \frac{\omega_s}{\kappa \beta_1 u_{*,c}} \quad (4.84)$$

É definido um factor de correcção relacionado com as ondas ( $F_w$ ) e um factor de correcção relacionado com as correntes ( $F_c$ ):

$$F_w = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^{ZW} - \left(\frac{a}{h}\right)^{1.2}}{(1.2 - ZW)\left(1 - \frac{a}{h}\right)^{ZW}} \quad (4.85)$$

$$F_c = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^{ZC} - \left(\frac{a}{h}\right)^{1.2}}{(1.2 - ZC)\left(1 - \frac{a}{h}\right)^{ZC}} \quad (4.86)$$

Por fim, a fórmula aproximada de cálculo da carga transportada em suspensão é:

$$q_s = (F_c + F_w) u_c h c_a \rho_s \quad (4.87)$$

Naturalmente, o total de carga transportada por correntes e ondas resulta da adição das parcelas correspondentes ao transporte junto ao fundo e ao transporte de material em suspensão.

$$q_t = q_b + q_s \quad (4.88)$$

Como foi exposto, o valor de  $q_s$  é obtido por duas vias, resultando valores diferentes se o cálculo for realizado de acordo com a equação 4.87, ou em função da resolução numérica da equação 4.81. Assim, na secção em que se procede à comparação de métodos, para a solução da carga total transportada adoptando a metodologia de Rijn resultam duas soluções, uma via da solução numérica do integral na definição da carga em suspensão e outra via a solução aproximada.

#### 4.2.4.2 Modelo de Soulsby e Rijn

Soulsby (1997) seguiu o trabalho desenvolvido por Rijn nas décadas de 80 e 90 e em conjunto apresentam um novo modelo. Este modelo considera o cálculo do transporte de sedimentos originado por ondas e correntes em simultâneo. A relação da carga total transportada é dada pela expressão:



$$q_t = A_s u_c \left[ \left( u_c^2 + \frac{0.018}{C_D} u_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - u_{cr} \right]^{2.4} (1 - 1.6 \tan \beta) \quad (4.89)$$

onde  $A_s$  traduz a soma dos efeitos do transporte em suspensão e junto ao fundo:

$$A_s = A_{sb} + A_{ss} \quad (4.90)$$

Estas parcelas são obtidas por aplicação das seguintes expressões:

$$A_{sb} = \frac{0.005 h \left( \frac{d_{50}}{h} \right)^{1.2}}{\left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50} \right]^{1.2}} \quad (4.91)$$

$$A_{ss} = \frac{0.012 d_{50} D_*^{-0.6}}{\left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g d_{50} \right]^{1.2}} \quad (4.92)$$

Para o perfeito entendimento da equação 4.89 é necessário ainda definir a forma de cálculo dos coeficientes de arrastamento devido ao efeito das correntes ( $C_D$ ), onde  $z_0$  representa o comprimento da rugosidade do fundo, que se admite igual a 0.006 m (fundo ondulado).

$$C_D = \left[ \frac{0.40}{\ln \left( \frac{h}{z_0} \right) - 1} \right]^2 \quad (4.93)$$

Para o cálculo da velocidade de corrente crítica é adoptada uma expressão em função da dimensão média das partículas do fundo:

$$\begin{aligned}
 u_{cr} &= 0.19(d_{50})^{0.1} \log_{10}\left(\frac{4h}{d_{90}}\right) & \text{se} & \quad 0.1 \leq d_{50} \leq 0.5 \text{ (mm)} \\
 u_{cr} &= 8.5(d_{50})^{0.6} \log_{10}\left(\frac{4h}{d_{90}}\right) & \text{se} & \quad 0.5 \leq d_{50} \leq 2.0 \text{ (mm)}
 \end{aligned} \tag{4.94}$$

Estas expressões serão válidas para valores de profundidade da água entre 1 m e 20 m e velocidades médias da corrente entre 0.5 m/s e 5.0 m/s.

$\beta$  é neste caso, o ângulo formado entre o leito e a horizontal, sendo positivo se o escoamento sobe segundo o leito.

Por fim, o valor da velocidade orbital média quadrática no fundo ( $u_{rms}$ ), devido à acção da onda é obtido por aproximação da curva do gráfico que relaciona o espectro de Jonswap para ondas aleatórias. Na falta da expressão de aproximação feita por Soulsby e Smallman em 1986, foi realizada uma aproximação de um polinómio do 4º grau, após a leitura de alguns pontos do gráfico. A expressão utilizada (o coeficiente de correlação em relação aos 33 pontos retirados do gráfico é de  $r^2 = 0.9995$ ) é a seguinte:

$$u_{rms} = \frac{H_s}{T_n} \left[ -7.115 \left( \frac{T_n}{T_z} \right)^4 + 11.349 \left( \frac{T_n}{T_z} \right)^3 - 5.143 \left( \frac{T_n}{T_z} \right)^2 + 0.151 \left( \frac{T_n}{T_z} \right) + 0.246 \right] \tag{4.95}$$

onde:

$$T_n = \frac{h}{g^{0.5}} \tag{4.96}$$

$$T_z = 0.781 T \tag{4.97}$$

#### 4.2.5 Análise de Sensibilidades

Como se verificou, a tentativa de explicação matemática e física dos fenómenos de transporte sedimentar ao longo da costa já existe com algum relevo desde os meados do século XX. No

entanto, pela complexidade envolvida, os resultados não são ainda os melhores e existem diferenças importantes consoante os pressupostos adoptados.

Interessa avaliar a importância relativa das diversas grandezas e o grau de fiabilidade atingido com os diferentes métodos. É de notar que face ao elevado número de parâmetros envolvidos, foi necessário fixar algumas grandezas para avaliar a importância relativa de outras.

Uma primeira análise foi efectuada por aplicação do método de Soulsby e Rijn, permitindo a comparação de resultados por variação de alguma das grandezas envolvidas e portanto, mantendo alguns pressupostos em todos os exemplos calculados. Assim, em todos os casos, se considerou a água do mar a 10 °C e com 35 partes por mil de salinidade. O fundo foi admitido plano, as ondas foram consideradas com um período de 10 s e a incidir com um ângulo de 90° em relação à direcção das correntes. A velocidade de queda dos sedimentos foi calculada segundo a proposta de Soulsby de acordo com a expressão 4.11. A altura do nível de referência foi de 1% da profundidade, sendo a espessura da camada de fundo com mistura constante de sedimentos igual a 10 cm e a rugosidade relativa, relacionada quer com as ondas quer com as correntes, admitida igual a 5 cm. Fez-se variar a dimensão média dos sedimentos, considerando-se sempre que o valor de  $d_{90}$  era duplo do valor  $d_{50}$ .

O gráfico da figura 4.11 mostra a evolução do transporte sólido com a profundidade para a situação particular de ondas com altura significativa de 6 m e períodos de 10 s, perpendiculares à costa e velocidades de corrente de 0.3 m/s. A dimensão média das areias definida para este cálculo foi de 0.5 mm.

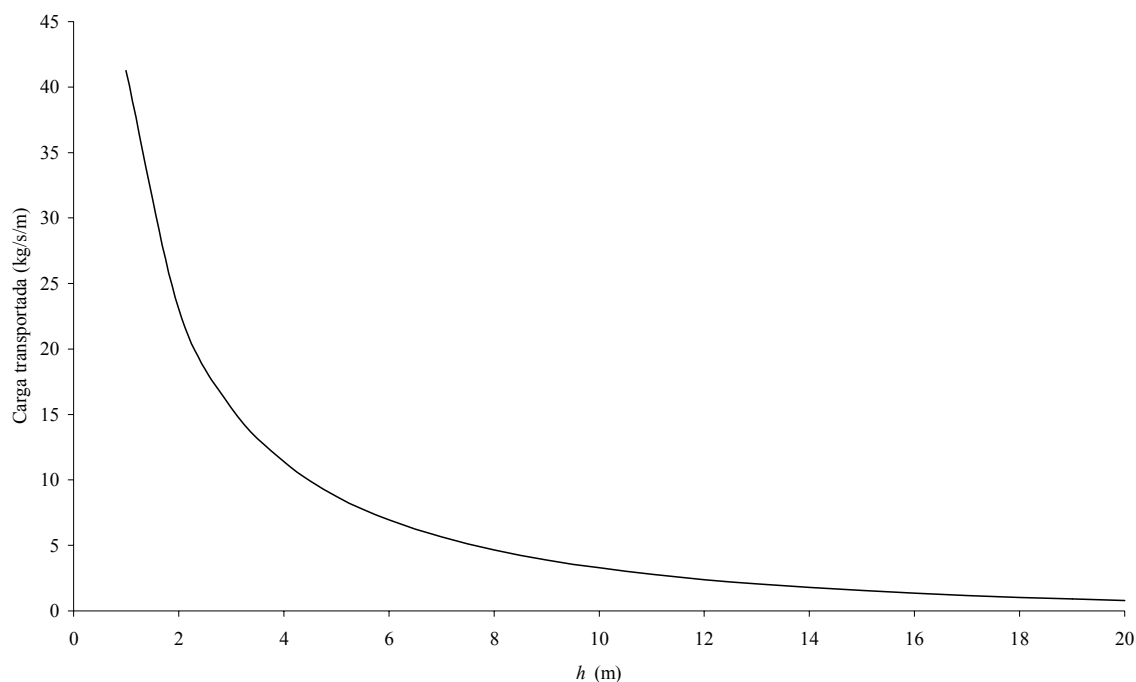


Figura 4.11: Carga sedimentar transportada para diferentes profundidades.

Este pequeno exemplo expressa desde logo a elevada importância da profundidade na avaliação da quantidade sedimentar em transporte. Às zonas menos profundas correspondem os maiores valores.

Para avaliar a importância de ondas e correntes foram conjugadas quatro situações distintas. A gama de dimensão média das areias na costa pode ser muito variável, pelo que foi estudado o comportamento de transporte sedimentar numa vasta gama de possíveis granulometrias. Além disso, optou-se por realçar uma gama de pontos, situada nos gráficos seguintes entre os 0.2 mm e os 0.6 mm. A análise gráfica permite verificar que as condições de agitação e de correntes, bem como a granulometria e a profundidade influenciam significativamente os resultados de transporte sedimentar.

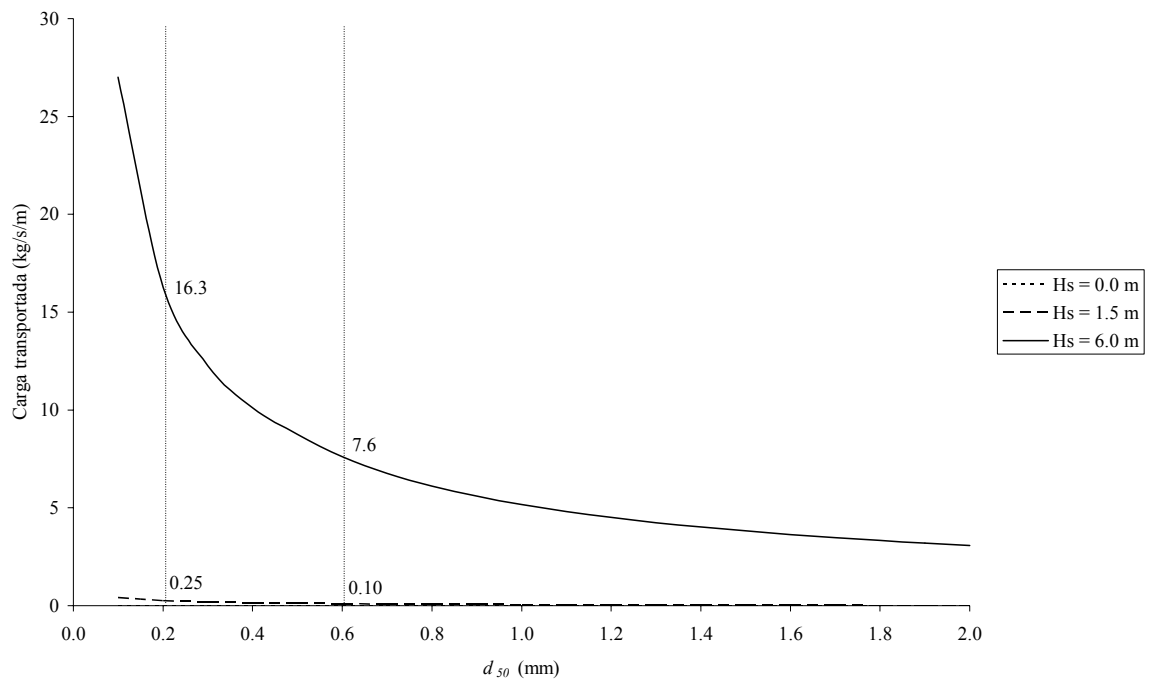


Figura 4.12: Carga sedimentar transportada.  
Velocidade de corrente de 0.3 m/s; Profundidade de 5 m.

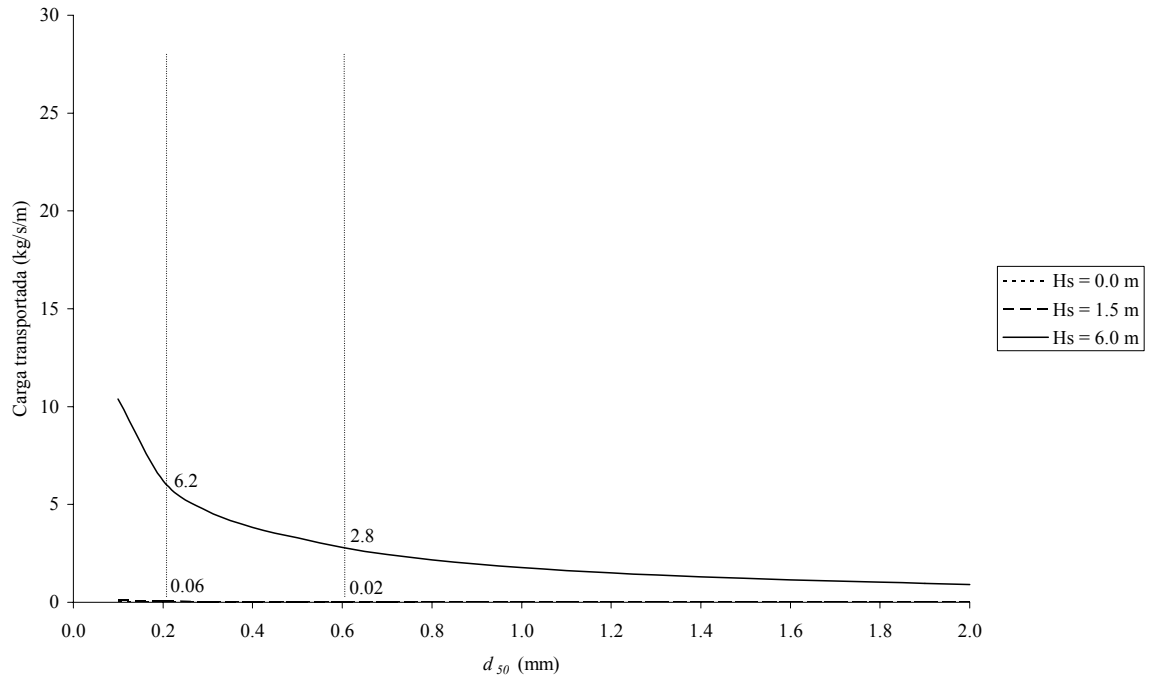


Figura 4.13: Carga sedimentar transportada.  
Velocidade de corrente de 0.3 m/s; Profundidade de 10 m.

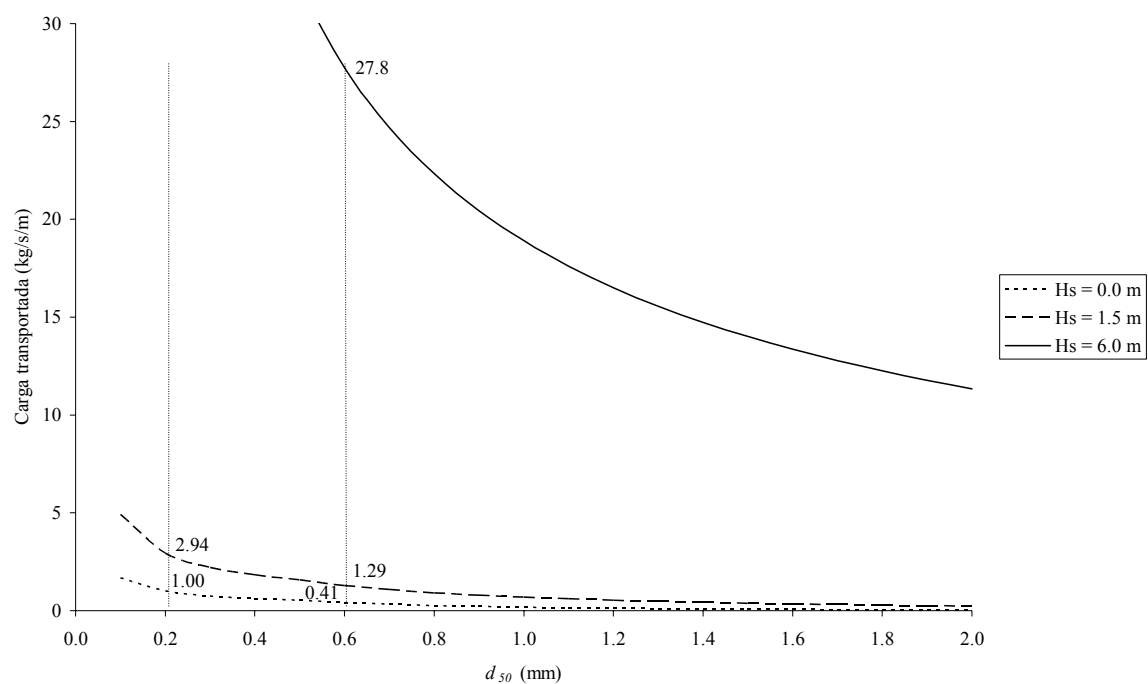


Figura 4.14: Carga sedimentar transportada.  
Velocidade de corrente de 1.0 m/s; Profundidade de 5 m.

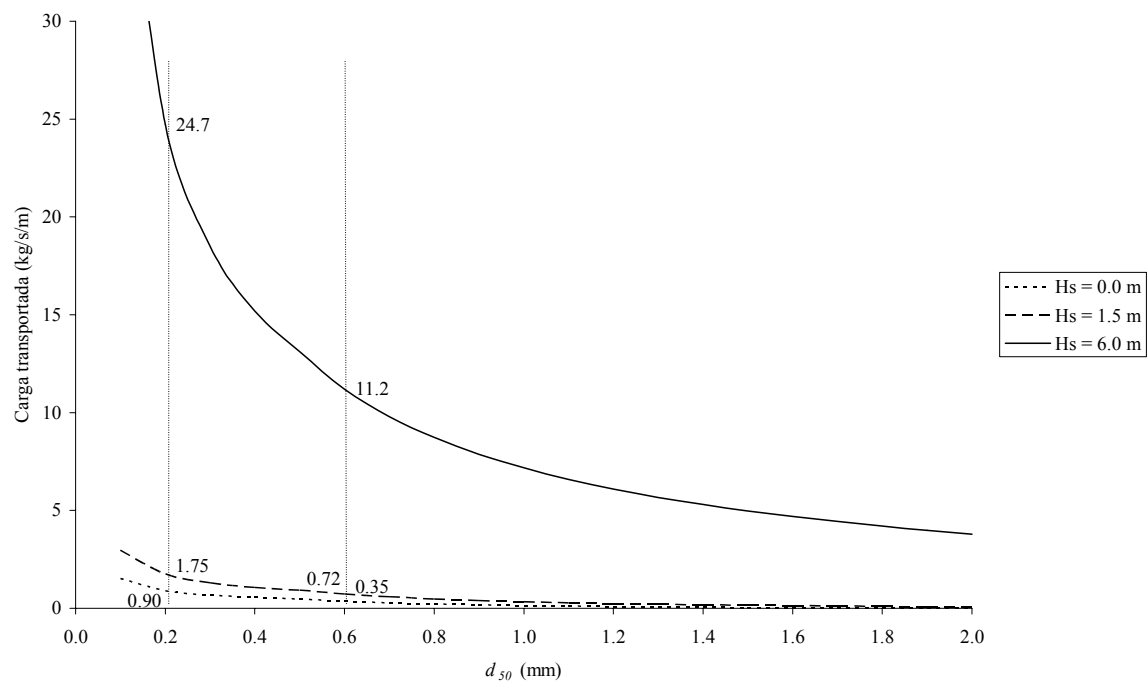


Figura 4.15: Carga sedimentar transportada.  
Velocidade de corrente de 1.0 m/s; Profundidade de 10 m.

Numa análise mais detalhada pode concluir-se que, quando a velocidade de corrente é pequena e não existem ondas, casos representados nas figuras 4.12 e 4.13, para  $H_S = 0$  m, não se criam condições de transporte de sedimentos. A diferença entre estes dois gráficos está na profundidade considerada. O aumento da profundidade de 5 m para 10 m conduz a reduções importantes da carga transportada por redução do efeito da acção das ondas. Assim, para ondas com alturas significativas de 6 m os sedimentos transportados passam a ser menos de 40% do que os registados para a profundidade de 5 m. Reduzindo a acção das ondas ( $H_S = 1.5$  m), então este efeito ainda é mais notado, passando os valores a ser abaixo dos 25% dos registos para a profundidade de 5 m.

Tendo em atenção os gráficos das figuras 4.14 e 4.15, nota-se a importância da velocidade de corrente. A comparação destes gráficos com os dois atrás referidos ilustra aumentos importantes da carga sedimentar transportada. Para ondas com  $H_S = 6$  m o acréscimo de sedimentos transportados aproxima-se de 400%, enquanto que para menores agitações a importância do aumento da velocidade de corrente é ainda mais significativa, ultrapassando largamente acréscimos de 1000%. Para velocidades de corrente de 1.0 m/s o aumento da profundidade provoca variações diferentes das registadas para as velocidades de 0.3 m/s. Assim, para agitação elevada ( $H_S = 6$  m) a redução de transporte com o aumento da profundidade é para valores de cerca de 40% dos registados aos 5 m de profundidade, próximo do obtido com as velocidades de corrente de 0.3 m/s. Para menor nível de agitação, a corrente passa a ser predominante no efeito de transporte, conduzindo a menores reduções no transporte. Para alturas de onda significativa de 1.5 m, o transporte em 10 m de profundidade passa a ser de cerca de 60% do obtido aos 5 m de profundidade, e para a situação de não haver ondas os valores passam a ser de 85% a 90% dos valores registados com 5 m de profundidade.

Realça-se ainda a importante redução de transporte com o aumento da dimensão das areias. Na gama de 0.2 mm a 0.6 mm a redução da carga é superior a 50%, qualquer que seja a situação de agitação e velocidades de corrente.

#### 4.2.6 Comparação Entre Modelos

Para situações idênticas de modelação, foram comparados os resultados obtidos entre os diferentes métodos expostos durante este capítulo. Novamente, os pressupostos de cálculo foram a água do mar a 10 °C e com 35 partes por mil de salinidade. Nos métodos em que é necessário, foi considerado o fundo e a velocidade de queda dos sedimentos calculada segundo a proposta de

Soulsby de acordo com a expressão 4.11. A altura do nível de referência foi de 1% da profundidade, sendo a espessura da camada de fundo com mistura constante de sedimentos igual a 10 cm e a rugosidade relativa, relacionada quer com as ondas quer com as correntes, admitidas iguais a 5 cm. Fez-se variar a dimensão média dos sedimentos entre os 0.2 mm e os 0.7 mm, considerando-se sempre que o valor de  $d_{90}$  era duplo do de  $d_{50}$ . Por simplicidade, para o modelo de Ackers-White considerou-se que o valor de  $d_{35}$  era de 75% da dimensão média. Em todos os casos se considerou a profundidade igual a 5 m.

Numa fase inicial, compararam-se os métodos correspondentes ao transporte de sedimentos junto ao fundo, por acção das correntes. Para obter resultados com uma grandeza razoável foi considerada uma velocidade de corrente de 1.0 m/s. Os resultados são expostos no gráfico da figura 4.16. Ao contrário do que é apresentado na expressão do modelo de Meyer-Peter e Müller, e por facilidade de conciliação de cálculo dos diferentes métodos, foi utilizada nos cálculos a tensão tangencial efectiva relativa ao efeito simultâneo de ondas e correntes definida pela expressão 4.66, enquanto o método propõe a utilização da tensão relacionada unicamente com as correntes. Este facto origina que os resultados obtidos sejam dependentes das características das ondas, ao contrário do que seria expectável.

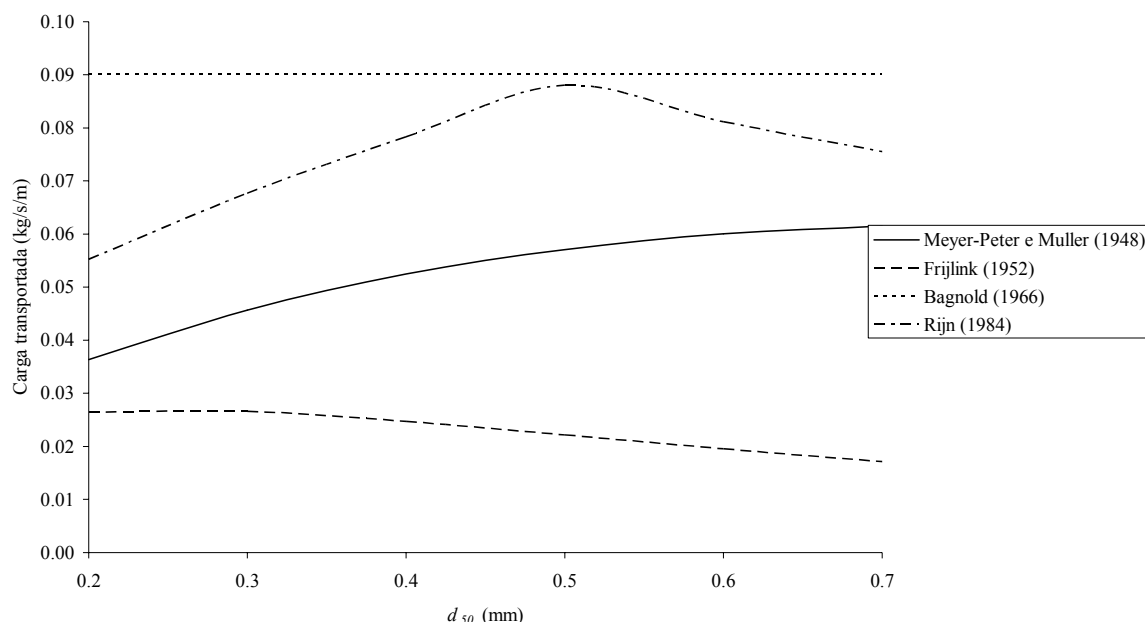


Figura 4.16: Carga sedimentar transportada junto ao fundo por acção das correntes.

Os métodos relativos ao transporte junto ao fundo, originado pelas correntes, são os mais antigos e têm por base a teoria de transporte sedimentar em rios. Para as diferentes granulometrias,



verificam-se flutuações relativas entre os resultados mínimos e máximos dos diversos métodos na ordem dos 300% a 500%. A variação da carga transportada em função da granulometria não é pacífica e dos quatro métodos expostos resultam quatro variações distintas. Bagnold propõe uma solução independente da dimensão dos sedimentos, enquanto pelos outros métodos obtêm-se cargas crescentes e/ou decrescentes com o acréscimo da dimensão média das areias.

No gráfico da figura 4.17 são apresentados os resultados do total transportado por acção das correntes (no fundo e em suspensão). Assim, à parcela de carga transportada junto ao fundo é adicionada uma parcela de carga transportada em suspensão. Os resultados obtidos traduzem um acréscimo significativo da carga transportada, quando comparados com os resultados expressos no gráfico anterior. O peso da parcela de carga junto ao fundo, no total transportado, aumenta com a dimensão das areias. No método de Bagnold, para  $d_{50}$  igual a 0.2 mm, a carga junto ao fundo representa apenas 15.7% da carga total, enquanto para  $d_{50}$  igual a 0.7 mm esse valor sobe para 45.0%. No método de Rijn essa relação varia entre os 13.1% e os 82.0%.

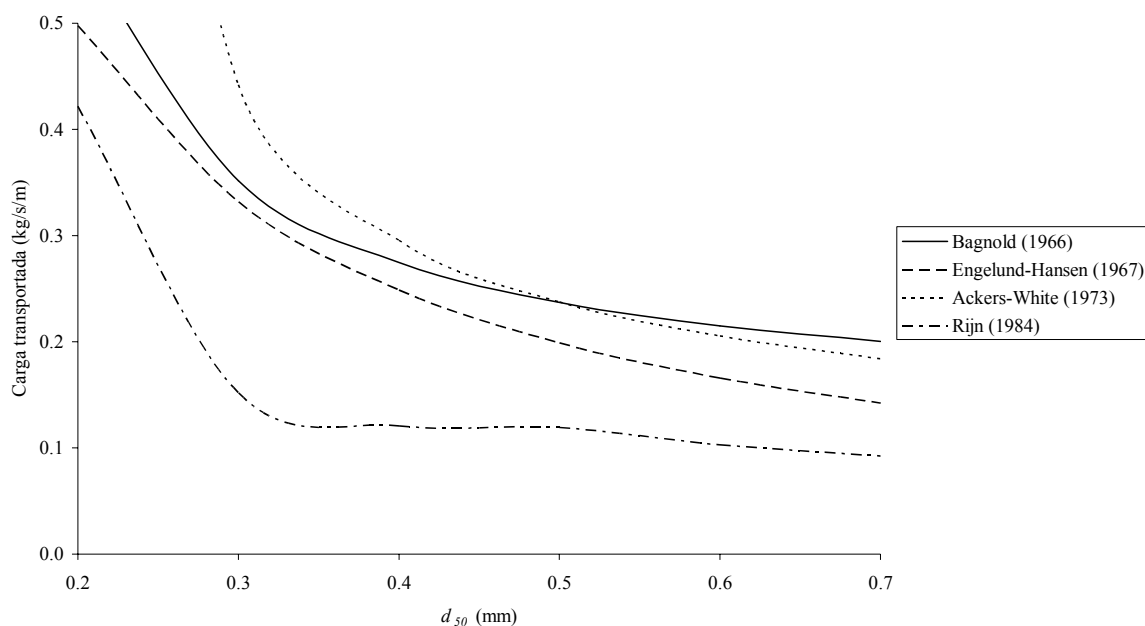


Figura 4.17: Carga sedimentar total transportada por acção das correntes.

Em relação ao total da carga transportada os quatro métodos expostos apresentam alguma similitude de comportamento. A carga transportada diminui com o aumento da dimensão dos grãos. Para as diferentes granulometrias, as flutuações relativas entre os resultados mínimos e máximos dos diversos métodos são menores que as do gráfico anterior, situando-se entre os 200% e os 300%.

Para a acção conjunta de ondas e correntes aplicaram-se os dois métodos expostos. As ondas foram consideradas com um período de 10 s e altura significativa de 6 m, a fazer um ângulo de 90° com a direcção das correntes. A velocidade de corrente considerada foi de 1.0 m/s.

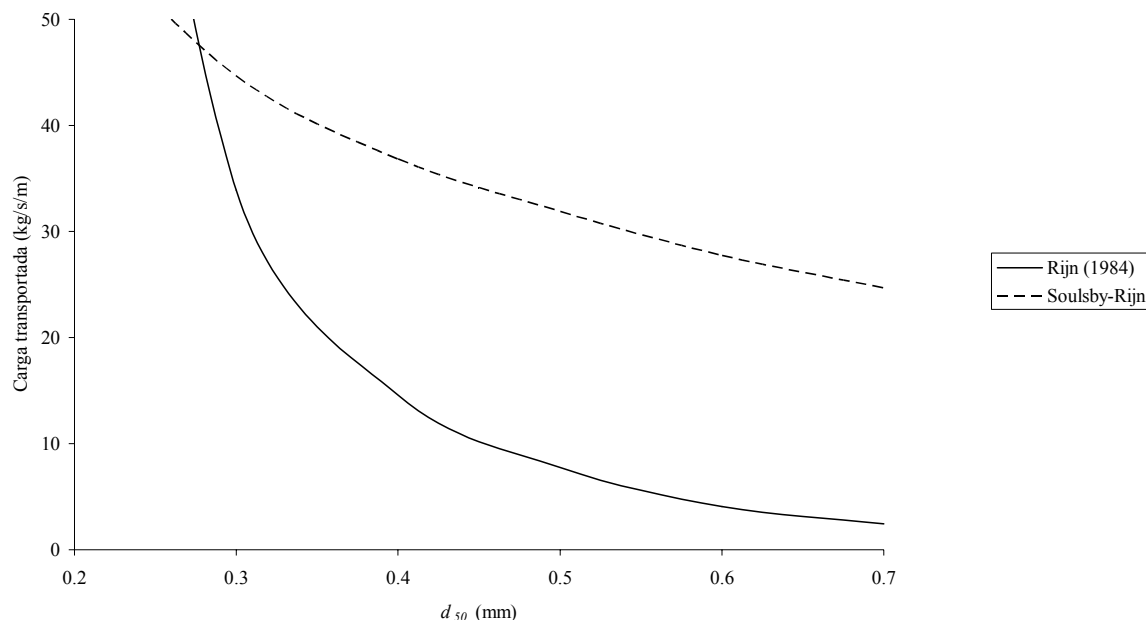


Figura 4.18: Carga sedimentar total transportada por acção conjunta de ondas e correntes.

Como se verifica por visualização gráfica, a solução proposta por Soulsby-Rijn é menos dependente da dimensão granulométrica das areias do que o método proposto por Rijn em 1984. Para o método de Rijn constata-se que a percentagem de carga transportada por acção das correntes é diminuta em comparação com a parcela relativa à acção das ondas (inferior a 5%). A acção das ondas com elevada altura significativa é fundamental na quantidade de sedimentos que é transportada.

Para a dimensão média de 0.7 mm, a diferença entre os dois métodos é superior a 1000%. Os resultados obtidos por Rijn, para uma dimensão média de 0.7 mm, correspondem a apenas 2.2% do valor que resulta das areias com dimensão média de 0.2 mm. A situação equivalente na metodologia de Soulsby-Rijn corresponde a uma carga de 41.7% da obtida para  $d_{50}$  de 0.2 mm.

Note-se que para a apresentação destes resultados se manteve constante uma grande diversidade de factores, apenas fazendo intervir diferenças na dimensão da granulometria. Para outros valores de velocidades de corrente ou de agitação marítima as percentagens apresentadas serão outras, mas interessa realçar as diferenças significativas que de qualquer forma se registariam.

A adopção de outros valores de rugosidades relativas, de níveis de referência, de velocidades de queda, ou de outras grandezas, não altera as diferenças relativas entre os diversos métodos e nem a dependência da dimensão média das areias.

#### **4.2.7 Conclusões**

A quantificação do fenómeno de transporte sólido longitudinal envolve uma grande diversidade de parâmetros e processos físicos. Estes estão ainda longe de ser bem traduzidos matematicamente, pelo que se verificam grandes incertezas quanto aos resultados que se obtêm.

A comparação dos resultados da modelação com situações experimentais criadas em laboratório, com parâmetros idênticos aos introduzidos no modelo conduz facilmente a incertezas de cerca de 100%. Quando se faz a transposição para situações reais que se verificam na natureza, a incerteza é ainda superior.

A evolução dos meios computacionais e o trabalho de investigação quanto a estes modelos poderá conduzir ao aumento da fiabilidade dos resultados (principalmente de laboratório). Mas o grau de incerteza das acções e a variação espacial e temporal dos parâmetros na natureza não permitirão resultados com o grau de exigência corrente nos projectos de engenharia. As projecções a realizar terão que garantir um coeficiente de segurança muito elevado.

Para a aplicação destes modelos não foram usados os dados de agitação representativos de estados reais de agitação, mas sim situações pontuais hipotéticas que permitem essencialmente ter a percepção dos principais mecanismos do processo de transporte longitudinal.

Realçam-se as grandes diferenças de valores obtidos nos diversos métodos, bem como a dificuldade de quantificar algumas das grandezas intervenientes nos cálculos. Alguns dos métodos foram aplicados com simplificações ou adaptações, de forma a não serem introduzidas ainda mais variáveis.

Os resultados dos diferentes modelos nem sempre são semelhantes em comportamento, como se constatou, por exemplo na figura 4.16, pois, para cargas transportadas junto ao fundo por acção de correntes não há consistência com a variação da dimensão das areias.

A percepção do nível de conhecimento e das incertezas associadas à avaliação do transporte sedimentar em situações reais (com muitos dos parâmetros a variarem no tempo e espaço, ou a serem de difícil quantificação) levou à adopção de uma metodologia dependente de um menor número de parâmetros, apresentada na secção 4.4 deste capítulo. Nessa análise o transporte sedimentar é avaliado numa perspectiva integral de volumes sólidos em circulação em toda a largura, incluindo todas as componentes de transporte (ondas e correntes, no fundo e em suspensão).

### **4.3 Processos de Transporte Sólido Transversal**

Desde o início da investigação da morfologia das praias que se tem estudado a mudança da forma do perfil transversal e das propriedades das barras submersas, posição da linha de costa e pendente na zona imersa (Villaverde, 1998).

Um perfil transversal de praia em equilíbrio pode ser conseguido num tanque de ondas em laboratório, com a acção das ondas mantida constante (ondas regulares, com a mesma altura, período e rumo). As praias naturais, sob a acção de ondas irregulares e para diferentes estados energéticos e rumos de agitação, tendem para perfis de equilíbrio dinâmico, associáveis a estados e sequências de agitação. No entanto, em termos de estudos, modelação e simulação, os perfis de praia só poderão ser entendidos em termos de equilíbrio entre ondas, correntes e sedimentos que compõem a praia (Komar, 1976).

Os perfis transversais de praia têm comportamentos sazonais tipificados. As ondas de menor altura, com maior probabilidade de ocorrência no Verão, movimentam a areia ao longo do perfil transversal, depositando sedimentos na praia e geralmente alargando a praia. Pelo contrário, durante períodos de tempestade, em que a altura das ondas e a sua capacidade energética é elevada, podem registar-se fortes erosões em curtos espaços de tempo. Geralmente, nos finais das tempestades, quando a altura das ondas diminui mas mantém ainda longos períodos, existe remoção da areia da praia e formação de bermas submersas, por migração das areias para zonas mais profundas (Kraus, 1992).

Assim, a análise do comportamento dos perfis transversais relaciona-se fundamentalmente com evoluções a curto prazo e relação entre comportamentos Verão/Inverno, ou em períodos de tempestade (ver figura 4.19). No entanto, associados aos perfis transversais estão conceitos

importantes na análise e modelação de comportamentos longitudinais e em planta, e previsões de evolução a médio e longo termo. Assim, neste subcapítulo são feitas algumas análises de conceitos e sensibilidades de variáveis.

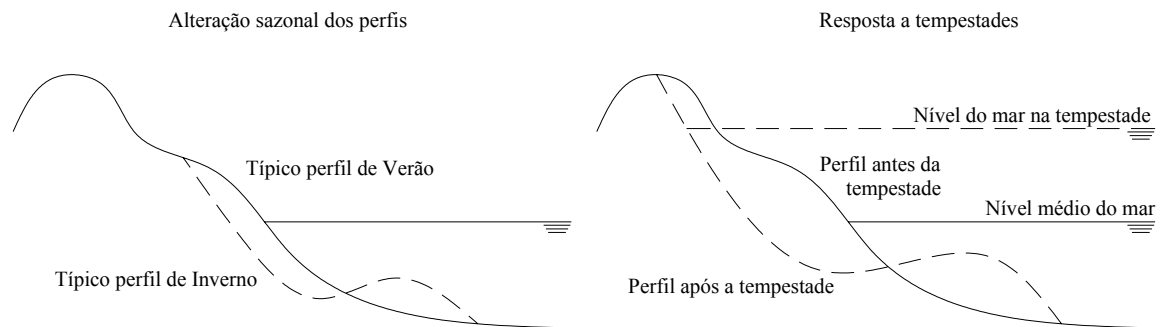


Figura 4.19: Situações típicas de perfis transversais, onde são importantes os processos de transporte sedimentar transversal (adaptado de Dean *et al.*, 2002).

Nesta análise não se incluem referências ao transporte eólico, já que o transporte eólico em termos transversais é muito pouco significativo face à dinâmica induzida pela agitação e marés. A não consideração do transporte eólico é um dos aspectos que pode ser objecto de crítica em relação aos modelos e formulações utilizadas, mas que no presente caso não tem relevância. No entanto, o transporte eólico é o mais relevante na dinâmica de dunas.

Outra análise dos perfis transversais poderá ser realizada na perspectiva de erosões ou acreções persistentes durante um longo período de tempo, originada pela alteração das condições de transporte sedimentar, até que se atinja um novo equilíbrio.

O caso da construção de um esporão é um exemplo, já que impede a transposição de sedimentos durante um período de tempo após a sua construção, originando deposição de sedimentos a barlar e déficit de sedimentos a sotamar (ver a figura 4.20). Este comportamento, no entanto é pouco abordado na investigação actual e deve ser mais desenvolvido devido à sua importância, como se conclui no desenvolvimento deste trabalho.

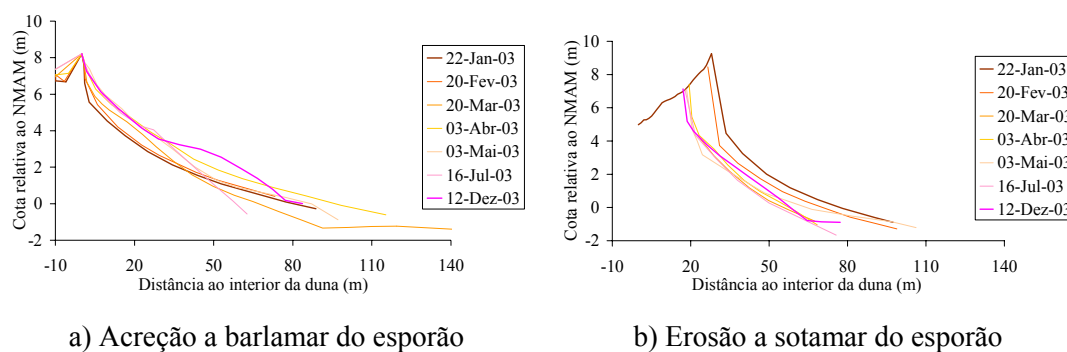


Figura 4.20: Alteração continuada dos perfis transversais nas proximidades do esporão do Areão, imediatamente após a construção do mesmo (levantamentos fornecidos por Sónia Rey, e realizados no âmbito do projecto CROP - PDCTM/P/MAR/15265/1999).

### 4.3.1 Inclinação da Face da Praia

Segundo Ferreira (1998), os estudos sobre a inclinação da face da praia ter-se-ão iniciado nos anos 30, mas apenas nas décadas de 60 e 70 se começaram a estudar os principais factores responsáveis pelas variações do pendor da praia. Os factores que influenciam a inclinação da praia serão principalmente a dimensão do grão dos sedimentos e as características das ondas (altura, período e declividade). O nível de maré, o lençol freático da praia e a velocidade de corrente longilitoral serão outros factores significativos.

Hughes e Turner (1999) referem que é raro observar na natureza uma praia que exiba uma inclinação uniforme e plana, pois as praias são tipicamente côncavas e as inclinações variam entre as diversas formações ao longo da costa (cúspides, etc.). Apesar disso, a existência de uma inclinação de equilíbrio da praia é um conceito útil para numerosas aplicações.

A definição de um declive representativo da face da praia é desde logo algo subjectiva face à existência de perfis transversais com geometrias complexas e variáveis no tempo. Hughes e Turner (1999) indicam que as características da praia podem ser adoptadas em qualquer localização, como a zona entre marés, ou mais frequentemente a interpolação linear dos valores desde a linha de costa em baixa-mar e a crista da berma ou a base da duna. Para Ferreira (1998), a face da praia localiza-se na zona de transição entre a praia emersa e a praia submersa, correspondendo à área afectada pelo espraiado da onda no decurso do ciclo de maré. Esta coincidirá frequentemente com a extensão de praia que se estende desde o nível mais baixo atingido pela maré, até à crista da berma.

Como não há uma técnica normalizada para a medição da inclinação da praia, este facto pode, por si só, explicar alguma da grande dispersão de valores aparente nos dados existentes.

Para Komar (1976), o equilíbrio da inclinação da praia depende fundamentalmente da quantidade de água perdida por percolação no espriado das ondas. O nível de percolação é governado essencialmente pela dimensão de sedimentos, já que as praias com areias de maior dimensão são mais permeáveis e as praias compostas por areias mais fina serão menos permeáveis. Assim, resulta que nas praias de areia mais grossa a acção de retorno do espriado das águas (refluxo) é reduzida e consequentemente a sua inclinação é maior. Estas verificações foram demonstradas por diversas experiências em tanques de ondas e trabalhos de campo.

Kamphuis, em 1986, apresenta a inclinação da praia na zona de rebentação, como uma função da altura de onda na rebentação e a dimensão média dos sedimentos (Kamphuis, 2000).

$$m = 1.8 \left( \frac{H_b}{d_{50}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.98)$$

Sunamura (1984) apresenta equações para a determinação da inclinação da praia, distinguindo as situações de laboratório (menores inclinações), das situações reais verificadas em campo. Como referem Hughes e Turner (1999), esse trabalho resultou da compilação de resultados de mais de 35 fontes e representa um estudo empírico da inclinação da praia. A equação apresentada por Sunamura para as situações de campo é:

$$m = \frac{0.12}{\left( \frac{H_b}{T_b \sqrt{g d_{50}}} \right)} \quad (4.99)$$

A expressão 4.100, proposta por Kriebel *et al.* (1991), corresponde à reanálise dos dados de campo de Sunamura e apesar da grande dispersão dos resultados analisados para praias encontradas na natureza representa uma tendência de comportamento. Na realidade, verifica-se que a inclinação da praia é normalmente maior para condições de ondulação que gerem acreção (ondas de menor altura) e que em condições de temporal (ondas de maior altura) a inclinação da praia torna-se mais suave (Kraus, 1992).

$$m = 0.15 \left( \frac{\omega_s T_b}{H_b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.100)$$

A representação gráfica destas equações para três situações distintas de alturas de onda na rebentação, admitindo uma relação entre alturas de onda e respectivos períodos de acordo com a expressão 3.1, realça as tendências de inclinações crescentes com a dimensão do grão dos sedimentos e decrescentes com a altura das ondas na rebentação (ver a figura 4.21). O comportamento das expressões é semelhante, mas os resultados obtidos pela expressão 4.100 representam valores mais elevados na generalidade das situações, enquanto os valores que resultam da expressão de Kamphuis são em todas as situações os que conduzem a menores inclinações.

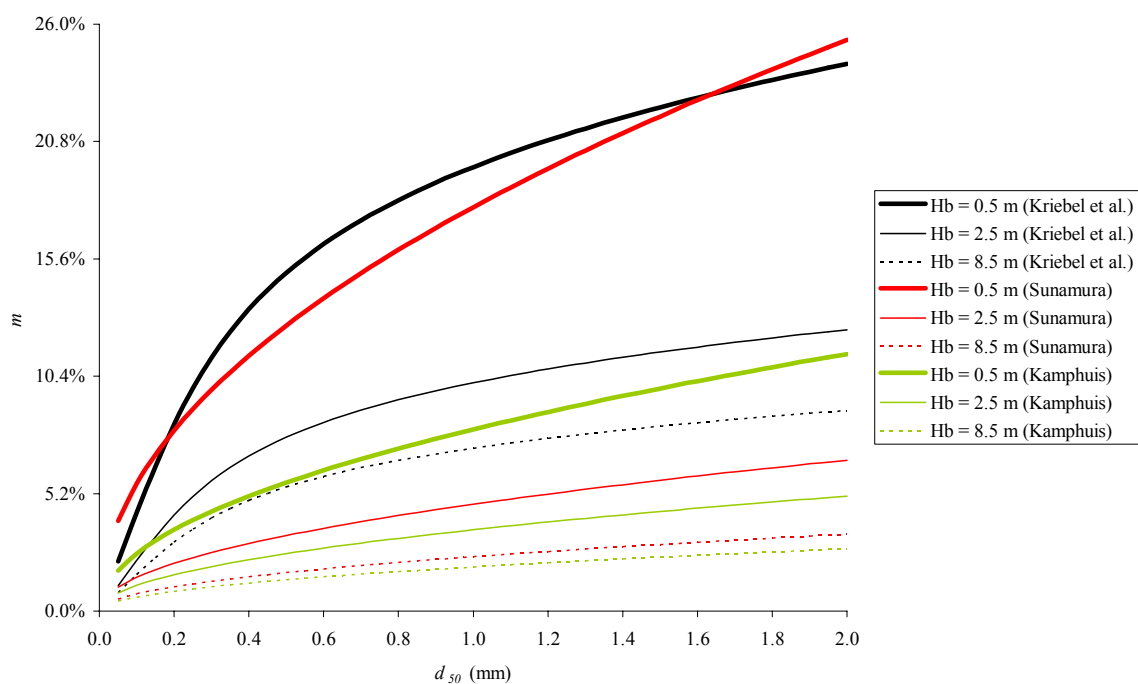


Figura 4.21: Variação da inclinação das praias com o diâmetro médio dos sedimentos, para diferentes alturas de onda.

Baptista *et al.* (2004) apresentam o acompanhamento da evolução das inclinações da praia numa extensão de cerca de 7 km, composta por dois trechos (um trecho natural e outro que sofreu intervenção humana por mobilização de areias), situado entre a Vagueira e Poço da Cruz, na região de Aveiro. Nesse trabalho é estabelecida a relação com o clima de agitação verificado nos dias anteriores às campanhas de campo, mas não é apresentada a relação com a granulometria. Os resultados apresentados na tabela 4.2, indiciam que em períodos de calma se verifica realmente um



aumento das inclinações da praia, enquanto para períodos de maior agitação as inclinações diminuem.

Tabela 4.2: Inclinações de praia entre a Vagueira e Poço da Cruz (retirado de Baptista *et al.*, 2004).

Campanhas	Valores médios de inclinação da praia		Clima de agitação (30 dias)	
	Trecho natural	Trecho artificializado	$H_S$ (médio)	$H_S$ (máximo)
28-05-2002	6.0%	4.5%	2.4 m	4.6 m
06-09-2002	9.3%	9.2%	1.2 m	1.8 m
06-11-2002	4.7%	4.7%	2.5 m	4.7 m

A variabilidade temporal dos valores médios de inclinação de cada trecho de praia não permite a adopção de um valor caracterizador da inclinação de uma praia numa análise a longo termo.

#### 4.3.2 Perfil Activo

O perfil activo está intimamente ligado com o conceito de profundidade activa, a qual também define desde logo a posição da largura activa do perfil. Numa definição lata, esta pode ser considerada a região do perfil transversal onde existem alterações de batimetria.

A definição de profundidade no perfil activo pode ser entendida de diferentes formas, um pouco em função do uso que se pretende dar ao valor da profundidade. Assim, profundidade de fecho, profundidade crítica, profundidade activa de movimento de sedimentos, profundidade máxima de erosão ou profundidade limite do processo de erosão das ondas são expressões encontradas sem grande precisão de definição (Kraus *et al.*, 1998). Neste trabalho vai recorrer-se invariavelmente à designação de profundidade de fecho ou profundidade activa.

A profundidade de fecho, correntemente definida como a profundidade a partir da qual não existem alterações significativas de cotas dos fundos, deixa um espaço considerável para diferentes interpretações, devido à palavra *significativas*. As alterações na batimetria e consequentemente na profundidade de fecho dependem das ondas, marés e outras acções hidrodinâmicas. Assim, considerar um valor único da profundidade de fecho para um trecho de costa pode até ser um pressuposto inválido (Morang e Parson, 2002).

Na ausência de medições no campo das variações da secção transversal dos perfis, para a determinação da profundidade de fecho será necessário aplicar expressões que permitem a estimativa dessas profundidades (Kraus *et al.*, 1998). A insuficiência e desactualização dos levantamentos hidrográficos na costa Oeste portuguesa (com excepção das zonas portuárias) são preocupantes e implicam a utilização dessas expressões.

De acordo com Morang e Parson (2002), a fórmula de Hallermeier (1978) relaciona a profundidade de fecho do perfil transversal com a altura da onda e o respectivo período. Hallermeier validou a sua proposta com dados de laboratório e de campo, descobrindo que a profundidade era independente da dimensão dos sedimentos para valores típicos de areias (0.16 mm a 0.42 mm), considerando ainda a relação habitual de 1.6 entre a densidade dos sedimentos e da água. Na expressão 4.101, o primeiro termo é proporcional à altura da onda e é o principal parâmetro definidor da profundidade de fecho. O segundo termo proporciona uma pequena correcção associada à declividade das ondas.

$$h_c = 2.28 H_s - 68.5 \left( \frac{H_s^2}{g T_{H_s}^2} \right) \quad (4.101)$$

Hallermeier propôs que a estimativa da profundidade de fecho obtida pela expressão fosse utilizada em relação ao nível de maré baixa, atingindo assim maiores profundidades do perfil transversal (Morang e Parson, 2002).

Kraus *et al.* (1998) referem que Birkemeier (1985) corrigiu os coeficientes da expressão de Hallermeier baseado na observação de perfis em Duck, na Carolina do Norte. As profundidades estimadas por Birkemeier são menores que as de Hallermeier e são expressas por:

$$h_c = 1.75 H_s - 57.9 \left( \frac{H_s^2}{g T_{H_s}^2} \right) \quad (4.102)$$

Na formulação original e com o objectivo de projecto, a profundidade era calculada para alturas significativas de onda junto à costa (aproximadamente a 10 m de profundidade) excedidas apenas 12 h/ano (0.137% do tempo). Uma extensão de cálculo poderá ser a determinação da profundidade associada a um determinado período de retorno de cada altura de onda. Em termos de projecto, os

valores obtidos pela expressão de Hallermeier são mais conservativos e por isso, mais recomendáveis como primeiro método de cálculo (Kraus *et al.*, 1998).

Tabela 4.3: Estimativa da profundidade de fecho dos perfis transversais, com base no clima de agitação em Leixões, registado entre 1981 e 2003.

$H_S$ (m)	$H_S$ excedida		<sup>(1)</sup> $T_{Hs}$ (s)	<sup>(2)</sup> $T_{Hs}$ (s)	Hallermeier (m)		Birkemeier (m)	
	%	Tempo/ano			<sup>(1)</sup> $h_c$	<sup>(2)</sup> $h_c$	<sup>(1)</sup> $h_c$	<sup>(2)</sup> $h_c$
0.5	99.0	362 dias	7.5	6.0	1.1	1.1	0.8	0.8
1.5	58.7	214 dias	8.7	9.0	3.2	3.2	2.5	2.5
2.5	26.9	98 dias	9.9	10.4	5.3	5.3	4.0	4.0
4.5	8.1	30 dias	12.4	12.0	9.3	9.3	7.1	7.1
8.1	0.14	12 horas	16.7	13.7	16.8	16.0	12.8	12.1
8.5	0.07	6 horas	17.2	13.8	17.7	16.7	13.4	12.6

<sup>(1)</sup> Valores obtidos para uma regressão linear do período de onda (expressão 3.1).

<sup>(2)</sup> Valores obtidos para uma regressão logarítmica do período de onda (expressão 3.2).

Para os valores de altura de onda ao largo de Leixões até 2003, a altura de onda significativa que é excedida apenas 12 h/ano corresponde a 8.1 m. Os valores de  $h_c$  obtidos pela equação 4.101 para qualquer altura de onda excedem em cerca de 30% os valores obtidos pela equação de Birkemeier. As diferenças introduzidas pela consideração de diferentes períodos de onda são de menor significado, representando até 7% de variação para os exemplos da tabela 4.3. Para maiores períodos de onda resultam maiores profundidades.

Assim, na tabela 4.3 apresentam-se as probabilidades de ocorrência de diversas alturas de onda significativa ao largo de Leixões e as respectivas profundidades de fecho. Os resultados expostos neste quadro são ligeiramente diferentes (cerca de 4%) dos apresentados em Coelho e Veloso-Gomes (2004), devido à inclusão de um maior número de dados de ondas, correspondentes aos anos de 2002 e de 2003, e consequentes correcções. Este facto realça a dependência dos resultados da profundidade de fecho em relação à qualidade e quantidade da informação disponível sobre a agitação marítima.

Ferreira (1993), depois de aplicar as expressões 4.101 e 4.102 a um pequeno conjunto de dados de agitação, considerou os resultados inadequados e assim, por considerações geomorfológicas,

admitiu como previsíveis valores para a zona a Sul de Aveiro, profundidades de fecho entre os 14 m e os 17 m. Estes valores não foram confirmados por medições de campo, mas vão ao encontro dos resultados aqui apresentados.

As diferenças entre os resultados das duas expressões representam um largo campo de valores possíveis, facilmente ampliado por alteração de outras considerações. Deste modo, medições periódicas no campo, da alteração dos perfis transversais e sua relação com o clima de agitação são necessárias para reduzir a incerteza associada a este conceito fundamental. Como se expõe de seguida, as características geométricas dos perfis transversais, dependendo da profundidade de fecho, são utilizadas na formulação dos perfis de equilíbrio ou na avaliação dos níveis de erosão originados pela subida do nível das águas do mar. Portanto, esses cálculos serão imediatamente afectados por este grau de incerteza (Coelho e Veloso-Gomes, 2004).

#### **4.3.3 Perfil de Equilíbrio**

Desde o início do século XX que as semelhanças observadas em perfis transversais à costa, conduziram ao conceito de equilíbrio em determinadas condições de praia. Este conceito foi aplicado à forma média dos perfis (Bruun, Dean) e à evolução da forma dos perfis durante tempestades (Edelman, Van de Graaff, Vellinga), como referem Roelvink e Brøker (1993).

O conceito de um perfil de praia de equilíbrio sempre foi criticado, já que na natureza, as acções que afectam o equilíbrio estão sempre em mudança, tal como as marés, as ondas, correntes, e ventos. Embora isto seja verdade, o conceito de um perfil de equilíbrio é uma das valiosas ferramentas da engenharia costeira. Muitos dos poderosos conceitos e relações de projecto são baseadas na noção de perfis de equilíbrio (Morang e Parson, 2002).

Sob condições onde não existe gradiente de transporte longitudinal, o transporte transversal à praia origina apenas uma redistribuição de areia pelo perfil mas não conduz a ganhos ou perdas de sedimentos. A maioria dos métodos aplicados à previsão de alterações do perfil transversal asseguram que o volume de areia total é conservado no perfil activo, de forma a que, a erosão da face de praia exposta seja compensada por deposição na parte submersa da praia, ou que acreção na face de praia exposta seja acompanhada por erosão na zona de rebentação (Morang e Parson, 2002).

Quando existe um gradiente no transporte longitudinal, é então comum a hipótese de que o perfil avança ou recua uniformemente em toda a extensão activa do perfil, mas mantém a sua forma. Deste modo, o volume de sedimentos pode ser somado ou removido do perfil, sem alterar a forma do perfil activo. Assim, a maioria dos métodos que tratam as alterações dos perfis de praia lidam separadamente com as componentes de transporte longitudinal e transversal, de maneira que a forma e localização do perfil final é determinada por sobreposição de ambos os efeitos (Morang e Parson, 2002).

Morang e Parson (2002) indicam que as propriedades que geralmente se podem observar nos perfis de equilíbrio correspondem a concavidades para cima, a inclinações da praia mais moderadas quando compostas de sedimentos mais finos ou sob a acção de ondas de maior altura. Os sedimentos mais grosseiros tendem a distribuir-se nas zonas menos fundas dos perfis, enquanto os sedimentos de menor dimensão se localizam em águas mais fundas.

Bruun (1954), partindo do pressuposto de dissipação uniforme da energia das ondas, baseado no estudo de perfis na Dinamarca e em Monterey Bay, na Califórnia, chegou a uma forma geral de equilíbrio expressa por:

$$h = Ax^m \quad (4.103)$$

onde  $h$  representa a profundidade à distância  $x$ , medida desde a linha de costa em nível médio, ou seja, no caso da costa portuguesa, à cota +2.0 m (ZH).

De acordo com Cowell *et al.* (1999), Dean (1977) confirmou a representatividade desta forma nos perfis de grande número de praias da costa americana do golfo do México e da costa Este americana (costa atlântica), quando a dissipação da energia das ondas por unidade de volume de água é a acção dominante. A utilização do modelo de Dean tem sido generalizado desde então, essencialmente no projecto de alimentação artificial de praias, no caso de praias arenosas onde os gradientes de transporte longitudinal se possam considerar desprezáveis.

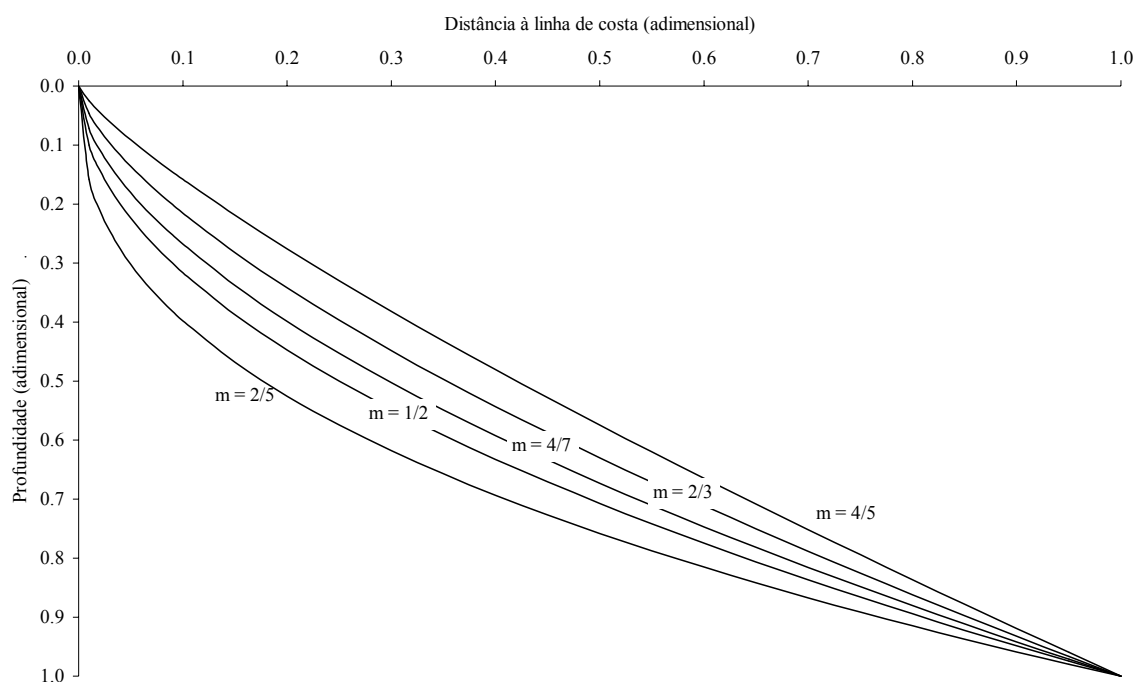


Figura 4.22: Representação adimensional do perfil de equilíbrio em função do expoente  $m$  (baseado em Cowell *et al.*, 1999).

O expoente  $m$  da expressão 4.103 pode tomar diferentes valores, em função do tipo de dissipação da praia em análise. Bruun e Dean propuseram o valor de  $m = 2/3$ , valor que se generalizou. No entanto, conforme o exposto em Cowell *et al.* (1999), autores como Bowen (trabalho teórico), Inman (trabalho de campo nas costa Este e Oeste americana e no delta do Nilo) e Kotvojs e Cowell (trabalho de campo no SE da Austrália), apontam o valor de  $m = 2/5$  para as praias reflectivas. Vellinga com perfis de erosão (laboratório e trabalho de campo na Holanda) e Kotvojs e Cowell (trabalho de campo no SE da Austrália) apontam  $m = 4/5$  para praias dissipativas. Para as praias intermédias, que como se viu anteriormente será a generalidade da costa Oeste portuguesa, as propostas são mais variadas. Boon e Green (trabalho de campo nas Caraíbas) indicam  $m = 1/2$ , Keulegan e Krumbein apontam  $m = 4/7$  (baseados na teoria de onda solitária) e Bruun e Dean (teoria e trabalho de campo) e Kotvojs e Cowell (trabalho de campo no SE da Austrália) referem  $m = 2/3$ .

A figura 4.22 pretende expor a importância significativa do valor de  $m$ . A forma do perfil será mais ou menos pronunciada em função do expoente da expressão 4.103, que se relaciona com a reflectividade da praia. O declive é menor nas praias dissipativas e mais acentuado nas reflectivas. Por exemplo, a profundidade relativa obtida para praias reflectivas ( $m = 2/5$ ) é 60% superior à das praias dissipativas ( $m = 4/5$ ), para uma distância da costa de 10% da largura do perfil. Durante os

períodos de tempestade o comportamento da praia será dissipativo e nos períodos de calma o comportamento tenderá a ser reflectivo.

Na equação 4.103,  $A$  é um parâmetro de escala dos sedimentos, sendo expresso em  $m^{1/3}$ .  $A$  depende fundamentalmente da dimensão dos sedimentos e pode ser obtido de acordo com a tabela 4.4 (Morang e Parson, 2002). Cowell *et al.* (1999) referem que a forma mais válida de obter o valor de  $A$  é por ajuste da equação 4.103 a perfis medidos. Este procedimento não é útil no caso da tentativa de previsão dos perfis, pois é posterior à medição dos próprios perfis.

Tabela 4.4: Valores recomendados de  $A$  e expressos em  $m^{1/3}$  (retirado de Morang e Parson, 2002).

$d_{50}$ (mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.0630	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.0840	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.1000	0.1030	0.1060	0.1090	0.1120	0.1150	0.1170	0.1190	0.1210	0.1230
0.3	0.1250	0.1270	0.1290	0.1310	0.1330	0.1350	0.1370	0.1390	0.1410	0.1430
0.4	0.1450	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.1530	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.1610	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.1670	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.1730	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.1790	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.1850	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.1940	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.1980	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.2020	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.2060	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.2100	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Nota: O facto dos valores de  $A$  se apresentarem com quatro casas decimais não significa que seja conhecido com tanta precisão, mas permite uma consistência e sensibilidade aos efeitos da variação da dimensão dos sedimentos.

De acordo com Cowell *et al.* (1999), Dean (1997) apresenta uma equação empírica, que se aproxima dos valores apresentados na tabela 4.4. A expressão 4.104 é função da velocidade de queda dos sedimentos.

$$A = 0.067 \omega_s^{0.44} \quad (4.104)$$

No entanto, outras relações são propostas, tais como a de Kriebel *et al.* (1991) para granulometrias entre 0.1 mm e 0.4 mm, também dependendo da velocidade de queda dos sedimentos. Hughes (1994), baseado em análise dimensional, sugere a mesma potência de 2/3 para a velocidade de queda dos sedimentos, na relação com o parâmetro  $A$  (Dean *et al.*, 2002).

$$A = 2.25 \left( \frac{\omega_s^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.105)$$

Moore (1982) relacionou graficamente o parâmetro  $A$  com o diâmetro médio dos sedimentos. Hanson e Kraus (1989) aproximaram a curva de Moore a uma série de linhas em função do diâmetro médio dos sedimentos da costa, expressos em milímetros, de acordo com a expressão 4.106 (Morang e Parson, 2002).

$$\begin{aligned} A &= 0.41(d_{50})^{0.94}, & d_{50} < 0.4 \\ A &= 0.23(d_{50})^{0.32}, & 0.4 \leq d_{50} < 10.0 \\ A &= 0.23(d_{50})^{0.28}, & 10.0 \leq d_{50} < 40.0 \\ A &= 0.46(d_{50})^{0.11}, & d_{50} \geq 40.0 \end{aligned} \quad (4.106)$$

Como se visualiza na figura seguinte, a comparação dos resultados da tabela 4.4 e das expressões 4.104, 4.105 e 4.106, revela algumas diferenças. Para a representação gráfica das expressões dependentes da velocidade de queda dos sedimentos foi adoptada a formulação de Soulsby, correspondente à equação 4.11. Nas granulometrias de maior dimensão as diferenças relativas são inferiores a 20% (não considerando a equação 4.105 na análise para granulometrias superiores a 0.4 mm de diâmetro médio), sendo mais significativas nas granulometrias com diâmetros médios abaixo de 0.3 mm. Para o diâmetro médio de 0.1 mm, a diferença nos valores extremos obtidos pelas várias expressões atinge quase 50%.



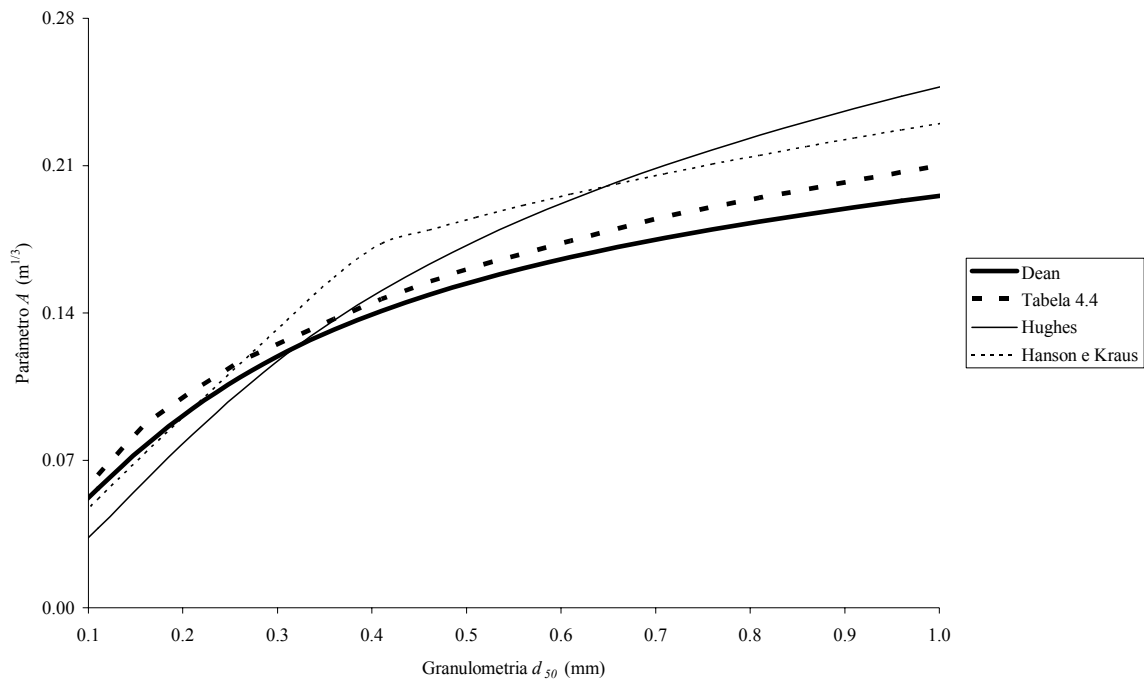


Figura 4.23: Comparação entre diferentes propostas de determinação do parâmetro  $A$ .

A grande vantagem da expressão 4.103 reside no facto de considerar apenas necessária a quantificação de um parâmetro relacionado com a dimensão dos sedimentos, para fazer a representação do perfil de equilíbrio. Este método apresenta a desvantagem de considerar uma inclinação infinita no ponto inicial de representação do perfil e também o facto da forma do perfil ser monotónica. Outros modelos foram propostos, incluindo pendentes de praia ou dividindo o perfil em duas partes ligadas por uma barra. Estes modelos introduzem também mais parâmetros (Zheng e Dean, 1997).

Bodge (1992) e Komar e McDougal (1994) propuseram um perfil em forma de uma exponencial diferente da apresentada na equação 4.103. A expressão apresentada por estes últimos autores inclui a inclinação da praia e uma constante determinada em função das características do perfil nos seus extremos. Assim, a exponencial proposta é:

$$h = \frac{m}{k} (1 - e^{-kx}) \quad (4.107)$$

onde  $k$  é determinado por:

$$k = \frac{1}{W_2} \left[ \frac{3}{2} - \left( \frac{6h_c}{mW_2} - \frac{15}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.108)$$

e  $W_2$  corresponde à largura submersa do perfil activo.

A aplicação desta forma fica limitada pela condição retirada da determinação de  $k$ , pois ter-se-á que respeitar a condição 4.109 para que o coeficiente  $k$  não corresponda a um número imaginário.

$$\frac{6h_c}{mW_2} > \frac{15}{4} \Leftrightarrow m < 1.6 \frac{h_c}{W_2} \quad (4.109)$$

Um dos poucos exemplos de modelo com introdução de uma barra submersa é o apresentado por Bernabeu *et al.* (2003). O perfil proposto engloba uma secção que corresponde à resposta à dissipação de energia e uma outra, correspondente à reflexão. Como é visível na figura 4.24, o perfil está dividido num perfil de rebentação e num perfil de baixa profundidade, ambos representados por expressões similares e dependentes de dois parâmetros cada. Na figura,  $h_r$  representa a profundidade do ponto de descontinuidade do perfil e  $h_a$  é a máxima profundidade em que o perfil satisfaz os pressupostos do modelo de baixas profundidades (Coelho e Veloso-Gomes, 2004).

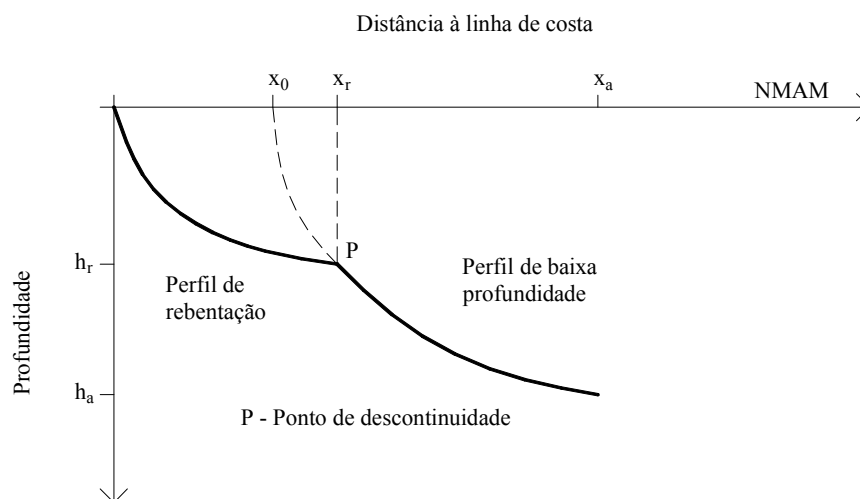


Figura 4.24: Perfil de equilíbrio, com duas secções (adaptado de Bernabeu *et al.*, 2003).

As expressões que correspondem a cada uma das divisões do perfil são expostas de seguida.

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{B}{A^{\frac{3}{2}}} h^3, \quad \text{para } 0 \leq x \leq x_r \quad (4.110)$$

$$X = x - x_0 = \left(\frac{h}{C}\right)^{\frac{3}{2}} + \frac{D}{C^{\frac{3}{2}}} h^3, \quad \text{para } x_r \leq x \leq x_a \quad (4.111)$$

A determinação da distância  $x_0$  não é clara e os coeficientes das expressões estão calibrados para praias espanholas, sendo dependentes da velocidade de queda adimensional ( $\Omega$ ), de acordo com as expressões 4.112 a 4.115.

$$A = 0.13 - 0.01\Omega \quad (4.112)$$

$$B = 0.005 + 0.26e^{(-0.75\Omega)} \quad (4.113)$$

$$C = 0.11 + 0.025\Omega \quad (4.114)$$

$$D = 0.006 + 0.1e^{(-0.73\Omega)} \quad (4.115)$$

Quando o parâmetro  $B$  é igual a zero, o perfil de rebentação corresponde ao perfil de Dean. Com o aumento da velocidade de queda adimensional, a energia de reflexão diminui e os coeficientes  $B$  e  $D$  aproximam-se de zero. Para baixos valores de  $\Omega$ , os coeficientes  $A$  e  $C$ , associados com a dissipação de energia e relacionados com a inclinação da secção do perfil, actuam de maneira oposta. O valor de  $A$  aproxima-se do máximo, enquanto o valor de  $C$  resulta mínimo. O valor de  $C$ , ao contrário de  $A$ , não depende só da dissipação de energia, mas também da altura da onda, conduzindo a respostas distintas das duas secções do perfil, sob diferentes condições de energia (Bernabeu *et al.*, 2003).

#### 4.3.4 Regra de Bruun

A subida do nível da água causa um desequilíbrio no perfil transversal. Admitindo a natureza côncava da parte superior do perfil, facilmente se verifica que a profundidade a uma distância de referência particular do contorno da nova costa passa a ser maior do que antes do nível de água subir. Se o perfil de equilíbrio fosse plano, então a subida do nível de água não mudaria a profundidade a uma determinada distância da nova linha de costa e não haveria nenhum desequilíbrio. Sem a introdução adicional de sedimentos no sistema, o único modo no qual o perfil

retorna ao equilíbrio é por recessão da linha de costa, cedendo sedimentos para encher o fundo para uma profundidade consistente com o perfil de equilíbrio e o novo (elevado) nível de água (Morang e Parson, 2002).

Bruun (1962) desenvolveu um modelo de ajuste do perfil transversal de uma praia à subida do nível do mar. Considerou que à medida que o material da praia vai sendo erodido, se vai depositando em zonas mais fundas (ver figura 4.25), havendo uma evolução do perfil no sentido do território emerso. A subida do nível dos fundos por deposição da areia acompanha a subida do nível do mar, mantendo a profundidade das águas constante (Komar, 1976). Desta forma, a massa conserva-se no perfil transversal, sendo o volume de erosão igual ao de deposição. Este é um pressuposto fundamental na modelação de perfis transversais.

Bruun propôs que a “resposta” do perfil à subida do nível do mar se traduzia num recuo da posição da linha de costa. O recuo ( $R$ ) pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$R = S \frac{W}{h + B} \quad (4.116)$$

onde  $S$  representa a subida do nível do mar,  $W$  a largura do perfil activo e  $h$  a respectiva profundidade.  $B$  é a altura da berma. Esta expressão proposta por Bruun foi sujeita já a diversas modificações. Alguns aspectos da regra de Bruun são de difícil definição, tais como estabelecer qual a largura do perfil activo (Dean *et al.*, 2002).

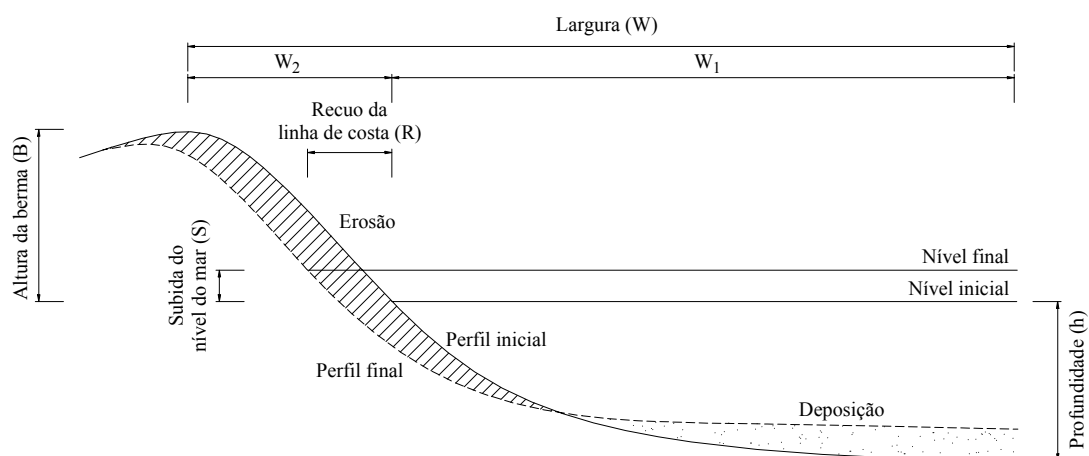


Figura 4.25: Efeito da subida do nível médio da água do mar na erosão costeira, segundo Bruun (adaptado de Komar, 1976).

Edelman (1972) aplica o conceito de perfil de equilíbrio para prever a erosão durante tempestades, desde que estas sejam suficientemente longas e constantes. Este modelo foi posteriormente melhorado por Vellinga com base num grande número de ensaios. Na equação, Edelman utiliza a largura e profundidade do perfil na rebentação. A equação proposta por Edelman é a 4.117.

$$R = W \ln \left[ \frac{h + B}{h + B - S} \right] \quad (4.117)$$

As variáveis passam a ser referentes às características na rebentação das ondas. Considerando estes valores iguais aos utilizados pela regra de Bruun, os resultados testados em Coelho e Veloso-Gomes (2004) são muito próximos.

Apesar de numerosos trabalhos de campo confirmarem os pressupostos da regra de Bruun e de outros estudos posteriores (que continuam a ser desenvolvidos), não há ainda a demonstração evidente que estes modelos possam prever as taxas de recuo da linha de costa. A incerteza dos parâmetros utilizados nas equações e a complexidade das considerações de balanço sedimentar são algumas das razões das limitações existentes (Dean *et al.*, 2002).

#### 4.3.5 Indicadores de Previsão de Erosão ou Acreção

Como já se referiu e é bem conhecido, as ondas de tempestade de Inverno tendem a remover material da face de praia e a depositá-lo perto da praia, como uma barra. Pelo contrário, as ondas de Verão tendem a alargar a praia (figura 4.19). Estudos de erosão ou acreção de uma praia, através de processos de transporte transversal têm sido realizados, geralmente baseados em modelos físicos a escala reduzida, como tentativa de desenvolver critérios de previsão.

Apresenta-se uma técnica simples que depende de dois parâmetros adimensionais, calculados de acordo com as equações 4.118 e 4.119.  $N_0$  representa o inverso da velocidade de queda adimensional e é vulgarmente designado pelo número de Dean.  $S_0$  é a declividade de onda em águas profundas (Kraus, 1992). Este método de previsão é dependente da dimensão média dos grãos dos sedimentos e do clima de agitação ao largo ( $H_0$  é a altura significativa de onda ao largo,  $T$  é o período de onda respectivo e  $L_0$  é o comprimento de onda). Na tabela 4.5 estão definidos os intervalos que correspondem a cada consequência previsível. A representação gráfica do critério é apresentada na figura 4.26.

$$S_0 = \frac{H_0}{L_0} \quad (4.118)$$

$$N_0 = \frac{H_0}{\omega_s T} \quad (4.119)$$

Outro critério simples que também separa a maioria dos eventos é a adopção de  $N_0 < 3.2$ , para acreção provável e  $N_0 > 3.2$ , quando a erosão é provável.

Tabela 4.5: Relação entre os números adimensionais e as probabilidades de erosão ou acreção de uma praia (Kraus, 1992).

Critério	Consequência previsível
$S_0 / N_0^3 < 0.00014$	Alta probabilidade de erosão
$0.00014 \leq S_0 / N_0^3 < 0.00027$	Provável erosão
$0.00027 \leq S_0 / N_0^3 < 0.00054$	Provável acreção
$S_0 / N_0^3 \geq 0.00054$	Alta probabilidade de acreção

A representação gráfica adoptada na figura 4.26 tem que ser entendida com cuidado para alturas de onda elevadas, pois a partir da altura significativa de onda igual a 5.7 m a posição da linha de alturas de onda passa a ser descendente. Assim, a análise das expressões 4.118 e 4.119 pode ser efectuada graficamente até alturas significativas de onda de 5.7 m e admitindo que a relação entre o período de onda e as alturas de onda segue a lei apresentada na equação 3.1.

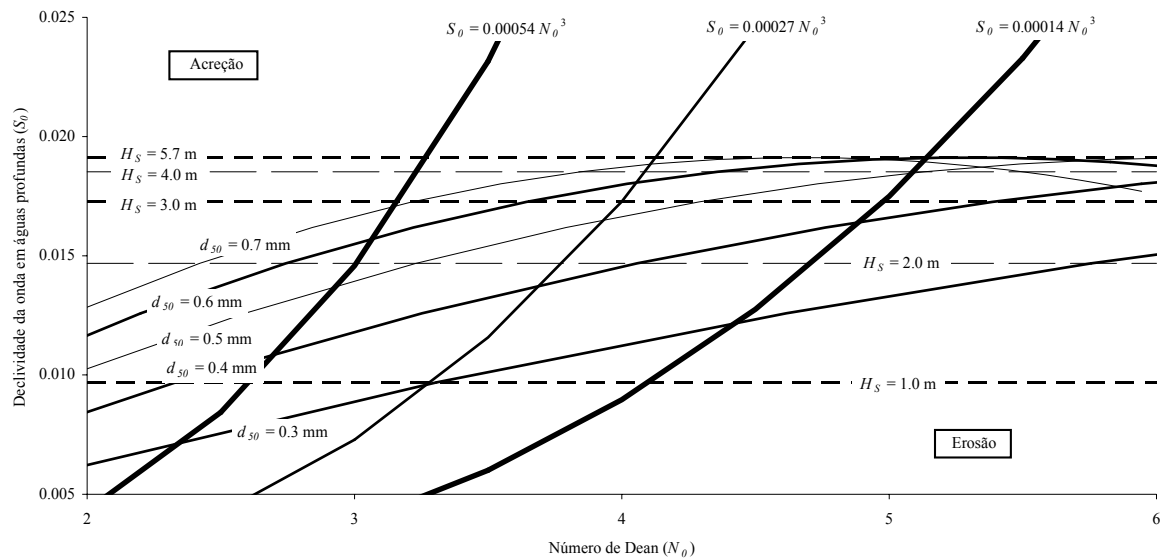


Figura 4.26: Acreção ou erosão das praias, dependendo da dimensão dos sedimentos e do clima de agitação (Coelho e Veloso-Gomes, 2004).

Tabela 4.6: Limites das alturas significativas de onda a partir dos quais há grandes probabilidades de erosão ou acreção, para diferentes granulometrias de areias (de acordo com os dados de agitação disponíveis da bóia de Leixões e uma relação linear com o período de onda respectivo).

$d_{50}$ (mm)	Acreção	Erosão
0.3	$H_s < 0.69$ m	$H_s > 1.43$ m
0.5	$H_s < 1.77$ m	$H_s > 3.95$ m
0.7	$H_s < 2.93$ m	$H_s > 6.97$ m

Dalrymple (1992) combinou diferentes parâmetros para produzir um parâmetro  $P$ , a que chamou o parâmetro de perfil.  $P$  é definido de acordo com a expressão 4.120 e o valor de 26500 distingue os eventos de erosão e de acreção (Kraus, 1992).

$$P = \frac{g H_0^2}{\omega_s^3 T} \quad (4.120)$$

Os resultados obtidos pelo critério que depende do parâmetro de perfil  $P$  e o que depende de  $N_0$  e  $S_0$  mostram uma divisão semelhante nas classificações de previsão de erosão e acreção.

A previsão de erosão ou acreção é altamente dependente da dimensão dos grãos dos sedimentos e do clima de agitação (Coelho e Veloso-Gomes, 2004). Como exemplo, apresenta-se na figura 4.27, as probabilidades de ocorrência de ondas superiores aos valores indicados na tabela 4.6 (erosão) e inferiores (acreção) ao longo dos diversos meses de um ano típico de agitação em Leixões.

De facto, para um tamanho médio dos sedimentos de 0.3 mm corresponde um limite de altura de onda de 1.43 m para erosão e 0.69 m para acreção. Para 0.5 mm de diâmetro médio dos sedimentos, os limites de altura de onda são respectivamente 3.95 m e 1.77 m. Por fim, os limites são 6.97 m e 2.93 m para as areias mais grossas, com 0.7 mm de diâmetro médio.

Assim, a figura seguinte mostra a probabilidade de erosão ou acreção baseado nos dados de agitação marítima ao largo de Leixões, para estas três dimensões de sedimentos. Para cada mês, as percentagens de ondas que ultrapassam a altura de onda de erosão e que são inferiores à altura de onda de acreção foram avaliadas. A altura de ondas entre esses dois limites representa a restante percentagem, que perfaz os 100%. O comportamento de curvas ao longo do ano é semelhante para todas as dimensões. As probabilidades de acreção aumentam durante o Verão. As probabilidades mais altas de erosão são durante os meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro. Nestas considerações, admite-se que a dimensão dos sedimentos é constante ao longo do ano.

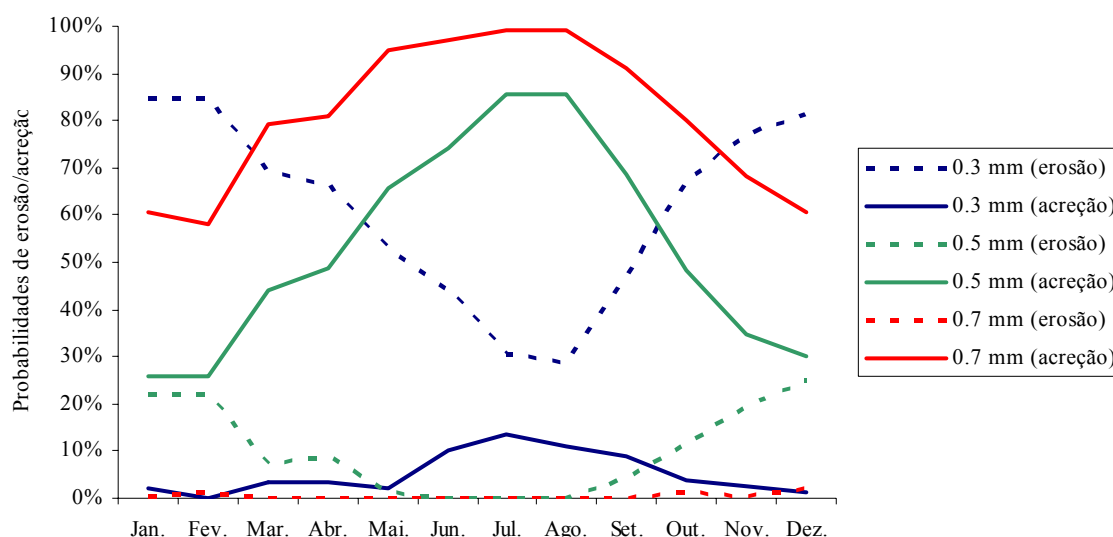


Figura 4.27: Previsão da probabilidade de erosão ou acreção de uma praia ao longo do ano, com base no clima de agitação, registado na bóia de Leixões.



A previsão da probabilidade de erosão ou acreção das praias através dos processos de transporte transversais é altamente dependente da dimensão dos sedimentos. Os resultados obtidos para as praias com sedimentos de maior dimensão reflectem uma baixa probabilidade de erosão e, por outro lado, as praias de areia fina têm uma probabilidade de erosão alta. Os valores de probabilidade altos obtidos para acreção de praias de areias mais grossas correspondem a alturas de onda significativa elevadas.

As variações de tamanho dos grãos ao longo do perfil transversal e durante o ano modificam o nível de aplicação do modelo, pelo que deveriam ser avaliados em análises futuras, mas apesar disso, a classificação por probabilidades parece ser um bom modo de representar os resultados. A grande amplitude de alturas de onda e dimensão dos sedimentos das praias da costa ocidental portuguesa representam as grandes diferenças nas probabilidades de acreção e erosão obtidas (Coelho e Veloso-Gomes, 2004).

#### **4.4 Avaliação do Potencial de Transporte Sólido Longitudinal**

A avaliação do potencial de transporte de sedimentos relaciona o volume de sedimentos com poucos parâmetros de ondas e da praia. A calibração de dados fica assim mais simples de conseguir, mas as respostas são menos sofisticadas. Exemplos destes métodos de avaliação são a fórmula CERC e a expressão de Kamphuis (Kamphuis, 2000).

Podem ser referidas duas aplicações práticas do controlo do potencial de transporte sedimentar longitudinal. A primeira será a redução da profundidade de rebentação por alteração da batimetria e a segunda a redução do ângulo de incidência das ondas na rebentação, também por alteração da batimetria, ou por alteração da inclinação da linha de costa com a direcção de incidência das ondas predominantes (Tsuchiya, 1982).

##### **4.4.1 Fórmula CERC**

A primeira fórmula para prever o transporte longitudinal de sedimentos surgiu por Munch-Peterson, um engenheiro Dinamarquês, em 1938. Nos EUA, a *Scripps Institute of Oceanography* sugeriu em 1947 uma fórmula também relacionada com a energia das ondas. A fórmula CERC foi adoptada em 1966 pelo *US Army Corps of Engineers*, no *Coastal Design*

*Manual*. Os *Shore Protection Manual* de 1977 e de 1984 foram actualizando a fórmula CERC (Rosati *et al.*, 2002). A versão mais actual destes manuais é o *Coastal Engineering Manual* (CEM).

Assim, esta é uma das formas mais antigas, mas apesar disso, ainda um dos métodos de maior sucesso na determinação do potencial de transporte sedimentar longitudinal. No início do século 20 ficou aceite na generalidade que o transporte sedimentar longitudinal é devido essencialmente à altura e direcção das ondas (Fredsoe e Deigaard, 1992). A aplicação da fórmula CERC fica limitada quando o efeito das correntes se torna significativo.

A fórmula assume que a rebentação das ondas se dá em águas pouco profundas e relaciona de uma forma empírica o potencial de transporte e o fluxo de energia da onda na rebentação. O volume de transporte de sedimentos é geralmente expresso em m<sup>3</sup>/dia ou m<sup>3</sup>/ano, incluindo o volume de vazios entre as partículas (cerca de 40%) e o volume de grãos sólidos.

A fórmula CERC é baseada em medições de campo e admite-se que a margem de aplicação esteja entre os 30% e os 50%. Há vários parâmetros que influenciam o potencial de transporte sedimentar, mas que estão excluídos da expressão, tais como o tipo de rebentação das ondas e a dimensão dos sedimentos (Wang *et al.*, 2002).

O método do fluxo de energia traduz uma forma de avaliação do potencial de transporte sólido longitudinal existente em determinada secção da costa. Rosati *et al.* (2002) apresentam uma descrição da fórmula CERC e que aqui foi aplicada por ser aquela cujo uso está mais generalizado.

$$Q_l = k \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16 k_b^{\frac{1}{2}} (\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b) \quad (4.121)$$

Esta expressão é homogénea em termos de unidades e permite o cálculo do potencial de transporte sólido longitudinal, sendo o resultado uma relação do volume de sedimentos que atravessa uma secção transversal à costa em determinada unidade de tempo.

As grandezas intervenientes nesta equação são a massa volúmica da água ( $\rho$ ), admitida igual a 1027 kg/m<sup>3</sup>, no caso de 10 °C de temperatura e com salinidade de 35 partes por mil.  $\rho_s$  é a massa volúmica do material do fundo, normalmente admitida igual a 2650 kg/m<sup>3</sup> (essencialmente de quartzo).  $g$  representa a aceleração da gravidade, tomando o valor de 9.81 m/s<sup>2</sup>.  $n$  é a porosidade

dos sedimentos, admitida igual a 40% de vazios ( $n = 0.4$ ). Este parâmetro permite a definição de volume transportado, por relação com o peso transportado. O índice de rebentação ( $k_b$ ), expressa a relação entre a altura de onda na rebentação e a respectiva profundidade. De acordo com a expressão 3.6, é usual admitir a relação de 0.78 para a definição da profundidade de rebentação.

$k$  é um coeficiente de proporcionalidade empírico e adimensional. Este parâmetro é proposto por diferentes autores, tomando diferentes valores. Rosati *et al.* (2002) referem o valor de 0.39, quando se está a lidar com alturas significativas. Na realidade, o parâmetro  $k$  serve para calibrar os resultados. Bodge e Kraus (1991) sugerem o valor de 0.32 e Schoonees e Theron (1993) referem o valor de 0.2. No modelo GENESIS de cálculo da evolução de linha de costa e que usa a fórmula CERC como base do modelo, o valor de  $k$  serve também para calibrar e situa-se geralmente entre 25% e 50% do valor recomendado no CEM (Wang *et al.*, 2002).

Valle *et al.* (1993) propõem uma expressão empírica que relaciona o valor de  $k$  com o diâmetro médio dos sedimentos. Os resultados evidenciam a tendência de diminuição de  $k$  com o aumento da dimensão dos sedimentos. Estes valores de  $k$  na fórmula CERC aplicam-se com alturas médias quadráticas de onda na rebentação (Rosati *et al.*, 2002).

$$k = 1.4 e^{-2.5 d_{50}} \quad (4.122)$$

Na equação,  $d_{50}$  é expresso em mm.

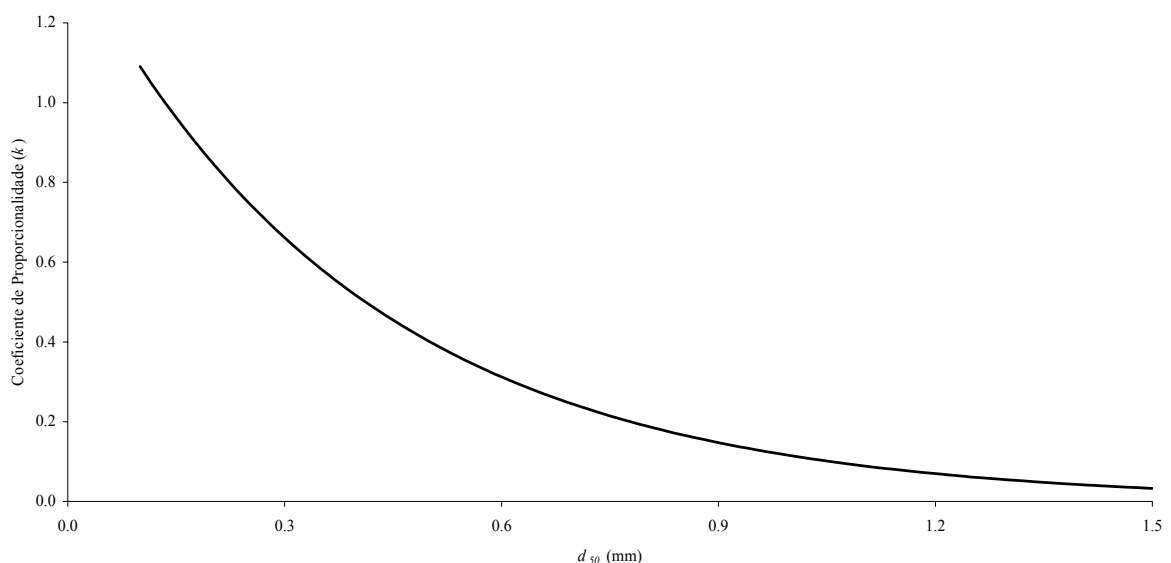


Figura 4.28: Variação do coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ) com a granulometria das areias.

Segundo Bailard, é possível apresentar  $k$  em função do ângulo de rebentação das ondas e da relação entre a magnitude da velocidade orbital e a velocidade de queda ou de sedimentação. A velocidade orbital ( $u_{mb}$ ) é calculada com base na altura de onda na rebentação, já que depende da profundidade de rebentação, bem como das constantes de Von Karman, de acordo com a seguinte expressão:

$$u_{mb} = \frac{\kappa}{2} \sqrt{g d_b} \quad (4.123)$$

Assim,  $k$  poderia ser obtido por aplicação da expressão 4.124.

$$k = 0.05 + 2.6 \sin^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{\omega_s} \quad (4.124)$$

A definição do ângulo entre a crista da onda na rebentação e a linha de costa ( $\alpha_b$ ) depende do que se entende por linha de costa. A variação do nível de maré implica a consideração de uma cota, em princípio correspondente com o nível médio das águas do mar. A linha de costa regista variações de direcção ao longo da sua extensão. Podem considerar-se a aproximação de uma linha média em determinada extensão de costa, ou a divisão por trechos, ou ainda a consideração da direcção para a qual convergem as ondas na rebentação, mas estas considerações conduzem a diferenças significativas nos resultados finais.

#### 4.4.2 Kamphuis

Baseado em dados de campo e de laboratório, Kamphuis *et al.* (1986) apresentaram uma expressão empírica que inclui a inclinação dos fundos e a dimensão dos sedimentos. A equação é:

$$Q_l = 1.28 \frac{H_b^{3.5} m}{d_{50}} \sin(2\alpha_b) \quad (4.125)$$

Nesta expressão,  $m$  representa a inclinação da praia e  $d_{50}$  a dimensão dos sedimentos, enquanto as restantes grandezas têm o significado já referido. A equação não é homogénea nas unidades e o coeficiente de 1.28 é válido para alturas de onda e dimensão dos sedimentos em metros, sendo o resultado expresso em kg/s (Wang *et al.*, 2002). A transformação para volumes obriga à divisão por  $(1-n) (\rho_s - \rho)$ .

Baseado em séries de estudos laboratoriais e reavaliação dos dados de campo, Kamphuis (1991) modifica a fórmula anterior, adicionando a influência do período de pico das ondas ( $T_p$ ).

$$Q_l = 6.4 \times 10^4 H_b^2 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad (4.126)$$

Nesta nova equação a influência da dimensão dos sedimentos e da altura das ondas é reduzida de uma forma significativa. A influência da inclinação dos fundos e do ângulo de incidência das ondas é também reduzida. Ainda segundo Wang *et al.* (2002), a expressão 4.126 prediz valores de potencial de transporte sedimentar mais baixos que a fórmula CERC. Para ondas com altura de rebentação inferior a um metro, os valores típicos de resultados da expressão de Kamphuis (1991) são 1.5 a 3.5 vezes inferiores aos da fórmula CERC e aos da equação 4.125.

Na expressão 4.127 a fórmula de Kamphuis resulta em valores expressos em m<sup>3</sup>/hora, se a altura de onda na rebentação for expressa em metros, o período de onda em segundos e a dimensão dos sedimentos em milímetros.

$$Q_l = 7.3 H_b^4 T_p^{1.5} m^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b) \quad (4.127)$$

#### 4.4.3 Distribuição Transversal do Transporte Sólido Longitudinal

Em geral, os estudos de campo e em laboratório indicam que níveis significativos do transporte longitudinal ocorrem na proximidade da linha de costa e que cerca de 10% a 30% do transporte total ocorre para lá da linha de rebentação (no sentido do mar). No entanto, as medições demonstram grande variabilidade na forma de distribuição transversal do transporte longitudinal (Rosati *et al.*, 2002).

Diversas formulações teóricas da distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal foram postuladas (Bagnold em 1963, Komar em 1977, Walton em 1979, Bailard e Inman em 1981), mas sem reproduzirem bem o resultado de medições de campo. Bodge e Dean propuseram uma relação em que os sedimentos que se movimentam são proporcionais à razão local de energia de onda dissipada por unidade de volume, conseguindo uma previsão razoável em comparação com um caso medido (Rosati *et al.*, 2002).

A dificuldade de conduzir trabalhos de campo para medição da distribuição transversal do transporte sólido longitudinal tem sido um obstáculo à determinação de quaisquer resultados. Thornton em 1973, Komar em 1977 e Tsuchiya em 1982 desenvolveram equações para prever a distribuição transversal do transporte longitudinal (Berek e Dean, 1982).

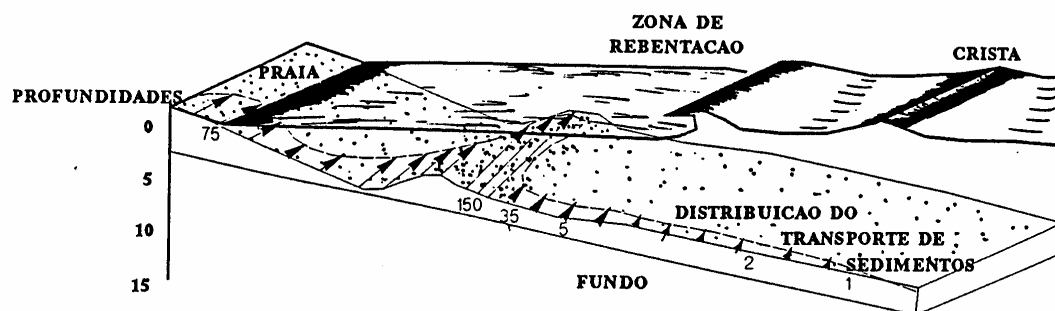


Figura 4.29: Esquema da distribuição transversal do transporte longitudinal de sedimentos (retirado de IHRH, 1992).

O programa de cálculo da evolução da linha de costa, GENESIS, faz uso da fórmula CERC. A distribuição transversal de transporte longitudinal nesse modelo é admitida uniforme até à zona de rebentação. Diversos estudos têm, no entanto, sugerido que na realidade essa distribuição não é uniforme, sendo um fenómeno ainda com fraco entendimento (Wang *et al.*, 2002).

A distribuição transversal do transporte sedimentar longitudinal é muito diferente para situações de diferente tipo de rebentação da ondulação. Assim, a zona junto à praia é sempre uma região de transporte significativo, mas no caso de ondas mergulhantes existe um pico de concentração da distribuição transversal na zona da rebentação das ondas. Este pico não sucede no caso das ondas do tipo progressivas. A distribuição transversal no caso das ondas progressivas é aproximadamente linear, aumentando na direcção da linha de costa (Wang *et al.*, 2002). Interessa notar que esta análise resulta de valores que foram obtidos experimentalmente, para alturas de onda significativa de 0.24 m e 0.27 m.

Os picos observados na distribuição transversal são muito reduzidos quando a agitação em análise é aleatória. Interessa comparar os resultados de laboratório com ondas regulares e resultados reais (Fredsoe e Deigaard, 1992).

Numa análise simplista, foi efectuado um raciocínio para estimar qual a distribuição dos sedimentos no perfil transversal. Assim, em função da probabilidade de agitação em ano médio

registrado em Leixões, e admitindo uma distribuição transversal constante para cada tipo de onda em toda a largura do respectivo perfil transversal activo, os resultados que se obtiveram foram os esquematizados na figura 4.30.

A curva de aproximação corresponde a um polinómio de 4º grau que permite estimar qual a percentagem do volume de sedimentos que é transportada até determinada distância da linha de costa.

$$Q_l = -1.5\left(\frac{x}{W}\right)^4 + 5.0\left(\frac{x}{W}\right)^3 - 6.4\left(\frac{x}{W}\right)^2 + 3.9\left(\frac{x}{W}\right) \quad (4.128)$$

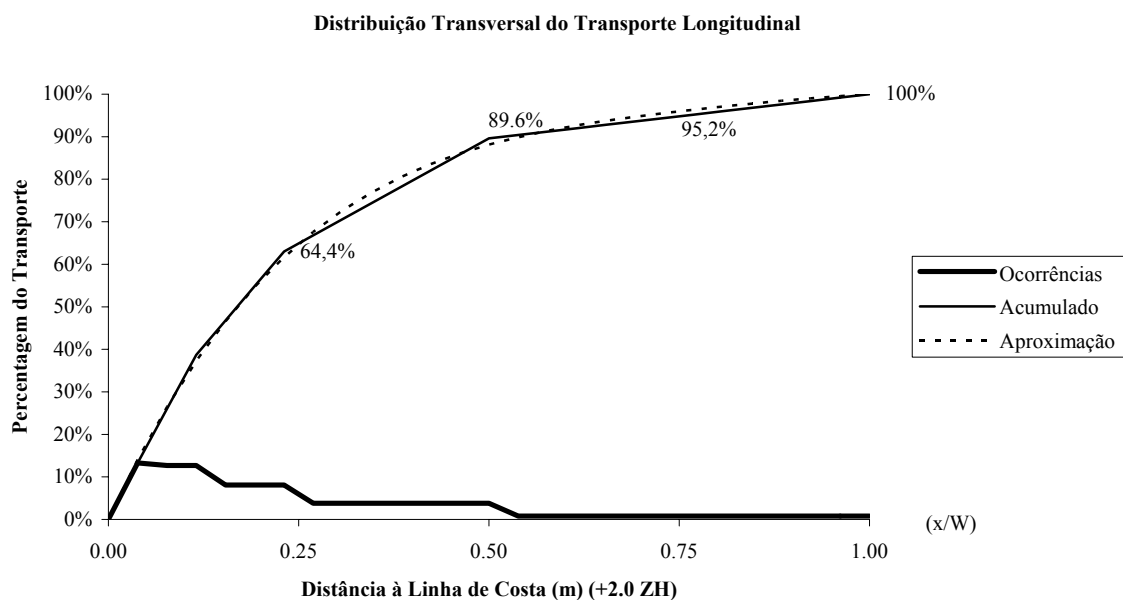


Figura 4.30. Distribuição transversal do transporte longitudinal ao longo da largura activa do perfil.

Assim, o valor de  $Q_l$  expresso na equação 4.128 representa uma percentagem do volume de sedimentos que cruza a secção até determinada distância da linha de costa, em função da largura de perfil activo. Note-se que a estimativa de volume que cruza a secção atinge quase os 90% em apenas metade da largura activa do perfil.





## Capítulo 5

### MODELOS DE CONFIGURAÇÃO DA “LINHA DE COSTA”

Tu perguntas e eu não sei,  
Eu também não sei o que é o mar.

*Eugénio de Andrade (in Mar, Mar e Mar)*



## 5 MODELOS DE CONFIGURAÇÃO DA “LINHA DE COSTA”

A “costa” (zona costeira, faixa costeira, orla costeira) pode ser definida como a zona de interacção entre as acções hidrodinâmicas marítimas e as fronteiras sólidas terrestres, nomeadamente as praias arenosas. Devido a esta interacção, a transformação e alteração da costa é permanente. O estudo destas transformações é algo complexo, pela diversidade de factores e parâmetros envolvidos. O Homem sente a necessidade da compreensão destes fenómenos, principalmente quando a evolução da costa interfere com as suas actividades e construções, sendo nessa altura também o Homem um agente interveniente no processo.

A designação “linha de costa” refere-se a uma forma cómoda de referir uma faixa complexa, ao considerar que existe uma linha representativa da transição entre a zona terrestre e a zona aquática. Se existisse uma situação estática, essa linha corresponderia à intercepção entre o plano da superfície livre da água e a zona terrestre. Face às situações dinâmicas (hidrodinâmicas e hidromorfológicas) essa linha de intercepção é também dinâmica e em muitos casos instável.

A descrição das configurações costeiras e da relação entre as formas e os processos envolvidos são a fundação das teorias acerca da evolução costeira. A teoria é frequentemente expressa em termos de modelos onde se traduz comportamentos sob situações controladas. A modelação é uma poderosa ferramenta que permite descrever como foi a evolução no passado e como poderá ser no futuro. As condições futuras não são conhecidas, mas vários cenários podem ser simulados e hipóteses testadas, baseadas em estatísticas e em probabilidades (Woodroffe, 2003).

Assim, o presente capítulo incide sobretudo sobre costas arenosas em que a agitação marítima assume uma grande relevância face a outras acções. A previsão da configuração da linha de costa ao longo do tempo constitui um objectivo essencial para o planeamento e gestão das zonas costeiras.

### 5.1 Modelos para Praias Enclausuradas

Nesta secção, o objectivo é apresentar um ponto da situação quanto a modelos de previsão da linha de costa. Quando a costa está situada entre dois pontos “fixos” naturais ou artificiais (espórões,

quebramares, cabos ou promontórios rochosos) e em particular, quando a agitação tem uma direcção dominante, a linha de costa assume em geral uma forma côncava em relação ao mar, resultante da interacção causada pela agitação marítima.

A configuração da linha de costa resulta dos processos de transporte de sedimentos, com movimento dos sedimentos na direcção de sotamar e com os processos de difracção das ondas que transportam os sedimentos na direcção oposta, nas imediações do ponto “fixo” de barlamar (Rosati *et al.*, 2002). Os fenómenos físicos envolvidos nestes processos são complexos e interagem entre eles (difracção, refacção, correntes, etc.), o que aliado a situações de insuficiência ou inexistência de dados de campo conduz a uma dificuldade na modelação e previsão da configuração da linha de costa, pelo que esta é ainda uma vasta área de investigação.

Tem-se admitido que, a longo termo, a costa tende a evoluir para uma situação aproximadamente perpendicular à orientação da agitação dominante, criando-se um equilíbrio “estático” se não existir transporte sedimentar longitudinal, ou um equilíbrio “dinâmico” se esse transporte existir com volumes constantes. O equilíbrio estático caracteriza-se por não existir alteração no regime de agitação dominante e pela rebentação das ondas acontecer praticamente em simultâneo ao longo de toda a linha da costa e com direcção ortogonal a esta. Como consequência deixa de haver transporte sedimentar longitudinal e surge o equilíbrio estático (Sweers, 1999). O equilíbrio dinâmico é difícil de prever, pois o volume de transporte longitudinal não é facilmente passível de se quantificar. No entanto, se a fonte sedimentar deixar de existir, então haverá evolução (previsivelmente erosão) até se atingir uma ortogonalidade em relação à agitação e nessa altura será atingido o equilíbrio estático.

Silvester e Hsu (1997) referem que actualmente só as costas em equilíbrio estático podem ser relacionadas com a agitação e a sua configuração ser prevista. A linha de costa pode atingir a forma espiral antes de atingir o equilíbrio estático, mas só as características desta são conhecidas.

Passa-se a apresentar um levantamento de modelos propostos, que se caracterizam por adoptar uma posição de equilíbrio estático entre pontos rochosos, naturais ou artificiais. Como alguns autores já se debruçaram sobre esta matéria, são várias as propostas de definição de linhas de costa no chamado equilíbrio estático, caracterizado por ausência de transporte sedimentar longitudinal. Estes métodos pressupõem em geral um rumo de agitação dominante a incidir na costa.

A designação aqui adoptada de praias enclausuradas já recebeu diversos nomes ao longo do tempo em que os investigadores foram dando a sua atenção a estas formas que caracterizam cerca de 50% das costas a nível mundial, em praias arenosas (Klein *et al.*, 2003). Yasso, Silvester, Komar e mais recentemente Medina, Kraus, Short, Masselink e Hsu são nomes ligados a este tipo de estudos.

### 5.1.1 Modelo em Forma de Parábola

Mashima (1961) refere o termo parábola para a configuração estável da linha de costa e apresenta a expressão 5.1 para definição dessa linha.

$$y = p x^2 - b \quad (5.1)$$

Nesta parábola,  $b$  é a máxima distância à linha que une os pontos “fixos” da costa (encontra-se para  $x$  igual a 0) e  $p$  é um coeficiente aplicado à coordenada  $x$  do sistema ortogonal de referência  $XY$ .

Na figura 5.1, o ponto  $C$  define o ponto médio da recta  $AB$ . O ponto  $D$  é encontrado, traçando desde  $C$  uma recta paralela ao eixo  $Y$ . Desta forma, a linha de costa construída, apresenta uma recta ( $AD$ ) e um trecho parabólico ( $DB$ ).

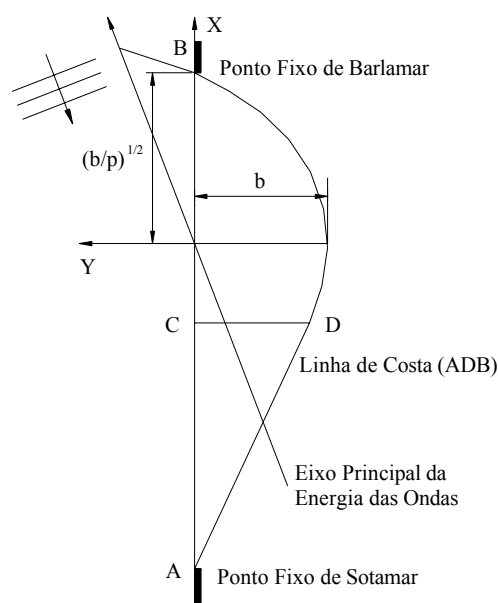


Figura 5.1: Parábola definida por Mashima (adaptado de Sweers, 1999).

A aplicação deste modelo a casos concretos da costa apresenta a dificuldade de centrar o eixo das coordenadas e a indefinição da posição dos pontos “fixos”. Sweers (1999) refere ainda que este modelo apresenta várias limitações, tais como não ter em consideração o fenómeno da difracção ou a direcção da agitação.

A reanálise deste modelo, em conjunto com o estudo de configurações de linha de costa em equilíbrio estático, conduziu a uma nova aproximação na forma de espiral parabólica, referida no ponto 5.1.3 deste trabalho.

### **5.1.2 Modelo em Forma de Espiral Logarítmica**

Yasso (1965) foi dos primeiros investigadores a verificar que várias baías naturais se aproximavam da forma de uma espiral. Silvester tem desenvolvido trabalho nesta área desde o início da década de 70. Foram diversos os autores que já comprovaram resultados relativos à curva espiral e esta foi aplicada intensamente desde a sua introdução, quer por geógrafos, quer por engenheiros costeiros (Sweers, 1999).

A expressão que define esta curva é apresentada na equação 5.2 e pode ser visualizada na figura 5.2. A equação 5.2 estabelece que a relação entre dois quaisquer raios  $R_2$  e  $R_1$  é proporcional a valores do ângulo  $\theta$  formado entre os dois raios. O ângulo  $\alpha$  formado entre a tangente à curva num qualquer ponto e o raio nesse ponto mantém-se constante para qualquer ponto da curva, pelo que é designado por constante espiral. A análise em simultâneo da expressão e da figura auxilia a compreensão das grandezas envolvidas.

$$\frac{R_2}{R_1} = e^{\theta \cot \alpha} \quad (5.2)$$

O valor da constante espiral  $\alpha$  pode ser obtido por aplicação da função que a relaciona com o ângulo  $\beta$ , sendo  $\beta$  o ângulo formado pela onda incidente dominante com o alinhamento definido pela linha que une os dois pontos “fixos” da costa.

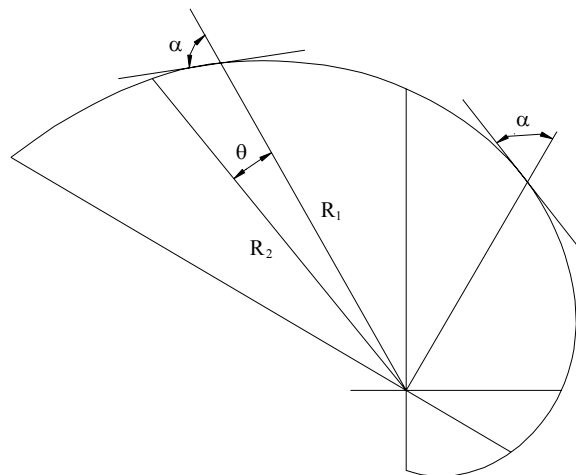


Figura 5.2: Esquema tipo de espiral logarítmica  
(adaptado de HP, 1981b).

Da função apresentada no gráfico da esquerda da figura 5.3 é obtido o valor de  $\alpha$ . Por aplicação da expressão 5.2 e conhecendo  $\alpha$ , para sucessivos valores de raios  $R_i$  rodados de um ângulo  $\theta_i$ , vão sendo conhecidos os pontos da curva espiral. Poder-se-á calcular o “índice de recorte” da linha do litoral ( $r$ ) segundo a função apresentada à direita na figura 5.3.

É referido por Sweers (1999) que a forma de espiral logarítmica tem a desvantagem de só ser aplicável na zona de sombra do ponto “fixo” de barlamar e que o centro da espiral não coincide com o ponto onde a difracção das ondas ocorre. A origem do referencial para a aplicação da expressão é portanto de difícil determinação. Blankers (1999) indica que se verificam diferenças significativas na aplicação da fórmula a baías existentes, principalmente para pequenos valores do ângulo  $\beta$ .

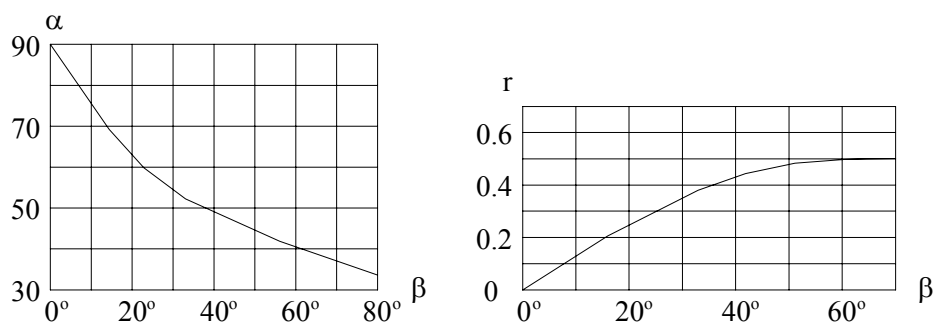


Figura 5.3: Valores da constante espiral  $\alpha$ , em função do ângulo de incidência da ondulação  $\beta$  e valores do “índice de recorte” da linha do litoral  $r$ , em função do ângulo  $\beta$  (adaptado de HP, 1981b).

Note-se, como atrás foi referido, que esta forma da linha de costa pode ocorrer ainda antes de se atingir a posição de equilíbrio, pelo que é grande a dificuldade de aplicação de critérios de estabilidade da linha de costa em projectos de engenharia.

### 5.1.3 Modelo em Forma de Espiral Parabólica

A reanálise do modelo de parábola de Mashima, conjuntamente com dados de zonas costeiras em equilíbrio levaram Hsu *et al.* (1987) a propor a expressão 5.3, correspondente à forma a que se passará a designar como espiral parabólica.

$$\frac{R}{R_0} = \frac{0.81\beta^{0.83}}{\theta^{0.77}} \quad (5.3)$$

Na equação, o valor de  $R_0$  corresponde à distância entre os pontos “fixos” da costa, definindo também uma linha de controlo com a qual é estabelecido o ângulo das ondas incidentes  $\beta$ . Ao contrário da espiral logarítmica, agora o ângulo  $\theta$  é definido desde a crista da agitação dominante. A percepção destes conceitos é mais fácil quando conjugada com a visualização da figura 5.4.

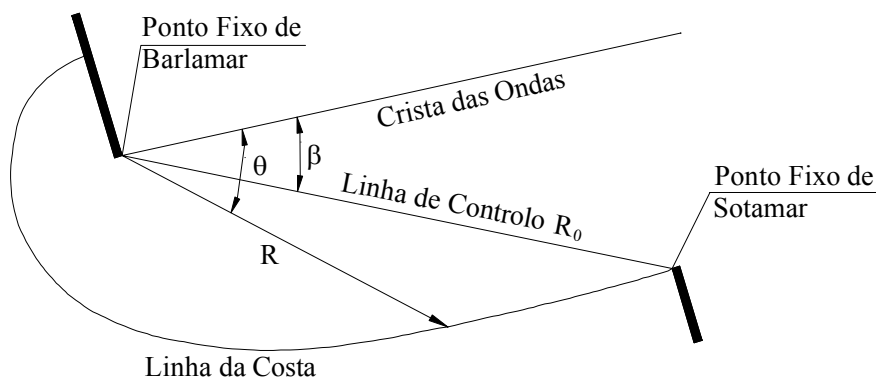


Figura 5.4: Esquema tipo de espiral parabólica (adaptado de Rosati *et al.*, 2002).

Neste modelo, a espiral é desenhada pela marcação de distâncias  $R$ , desde o ponto de difracção (ponto “fixo” de barlamar), fazendo ângulos  $\theta$  com a linha de crista das ondas. Para uma linha de costa em equilíbrio, a linha de controlo fará o mesmo ângulo  $\beta$  com a crista das ondas e com a tangente à linha de costa no ponto “fixo” de sotamar. Sweers (1999) refere Silvester, Ho e Everts, para afirmar que mesmo atingida a situação de tangência com um ângulo  $\beta$  no ponto “fixo” de



sotamar, a configuração da linha de costa pode não ser completamente estável, havendo erosão para além dos limites definidos por este modelo.

Sweers (1999) refere ainda que esta equação prediz a forma da linha da costa com sucesso para valores de  $\theta$  entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$ . A forma da linha de costa difere da equação essencialmente na zona de sombra do ponto “fixo” de barlamar, ou seja, para valores elevados de  $\theta$  ( $120^\circ$  a  $180^\circ$ ). A explicação para este comportamento é avançada por Sweers (1999), indicando as grandes difracções e a pequena altura das ondas nesta zona, para justificar uma lenta evolução da linha de costa, que é anulada quando existem condições de tempestade ou de agitação contrária, nunca evoluindo para a previsível configuração estável.

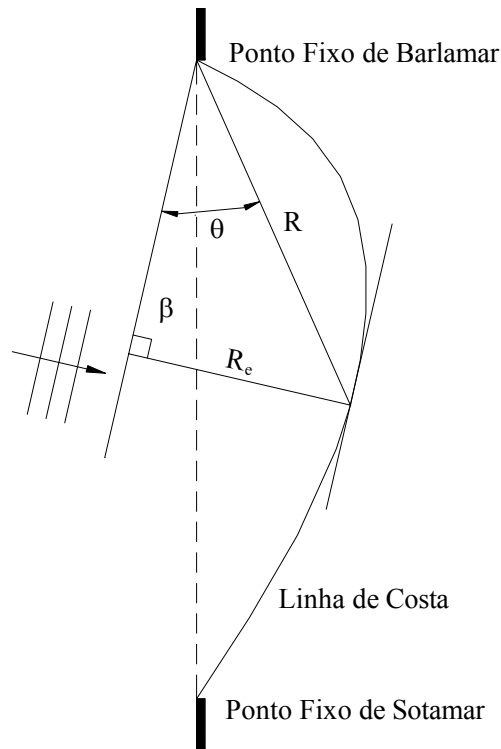


Figura 5.5: Esquema tipo da localização do ponto de máximo recorte da costa.

Para a determinação do máximo recorte da linha litoral, supondo o critério adoptado por Sweers (1999), ter-se-á que analisar a componente de  $R$  paralela à direcção de propagação das ondas. Desta forma, designando esta componente por  $R_e$ , de acordo com a figura 5.5, tem-se que:

$$R_e = R \sin \theta \quad (5.4)$$

Substituindo  $R$  em função de  $R_e$  na equação 5.3, obtém-se:

$$R_e = R_0 \sin \theta \frac{0.81 \beta^{0.83}}{\theta^{0.77}} \quad (5.5)$$

O máximo da expressão corresponde ao recorte litoral máximo e é obtido no ponto onde a derivada da equação 5.5 em ordem a  $\theta$  iguala o valor 0. Procedendo à realização destes cálculos obtém-se por fim, que o ângulo  $\theta$  que define a posição de máximo recorte é constante e aproximadamente igual a 45°.

#### 5.1.4 Modelo em Forma de Espiral Polinomial

A curva proposta por Hsu e Evans (1989), a que se passará a designar como espiral parabólica polinomial ou simplesmente espiral polinomial, teve por base dados de baías consideradas em equilíbrio e dados obtidos em modelos físicos. A expressão proposta para a linha de costa na proximidade do ponto “fixo” de barlamar é apresentada de acordo com a equação 5.6 e resulta da evolução da espiral parabólica apresentada no ponto anterior deste texto.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (5.6)$$

O significado de  $R$ ,  $R_0$ ,  $\beta$  e  $\theta$  é o mesmo do definido na espiral parabólica, pelo que a figura 5.4 é adequada também para esta curva.

É referido por Rosati *et al.* (2002) que a equação 5.6 se baseia em dados recolhidos para situações em que o ângulo  $\beta$  não baixa do limite inferior de 22°. Para a aplicação da expressão é assumido que existe uma direcção de agitação predominante e que o ângulo  $\theta$  se situa entre  $\beta$  e 180°. Para valores de  $\theta$  superiores a 180° considera-se que o valor de  $R$  é constante e igual ao obtido para  $\theta$  igual a 180°.

Os coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  da expressão 4.6 são obtidos em função do ângulo  $\beta$ . A figura seguinte representa as funções para obtenção dos coeficientes com base no ângulo  $\beta$ .

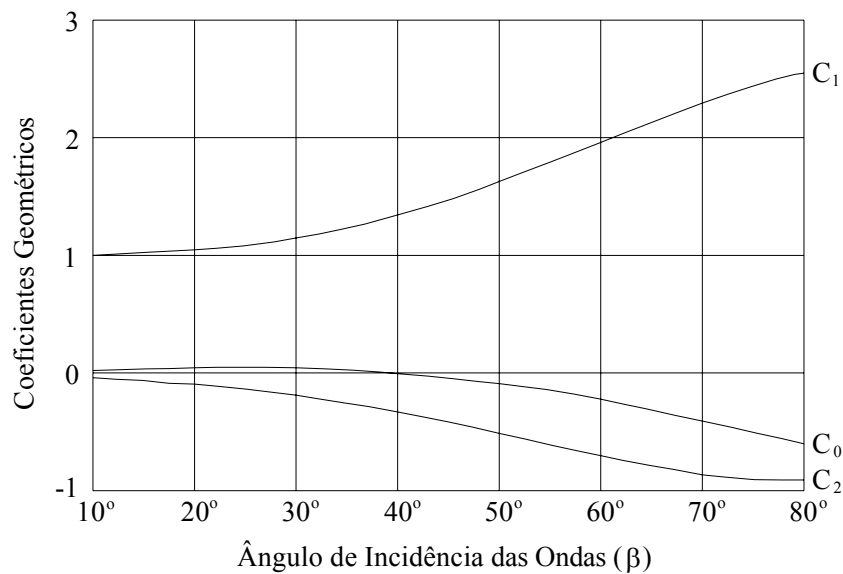


Figura 5.6: Valores dos coeficientes da forma de espiral polinomial, em função do ângulo  $\beta$  (adaptado de Rosati *et al.*, 2002).

É referido por Sweers (1999) que esta expressão é a que actualmente melhor representa as linhas de costa em equilíbrio, mas pelo facto de estar dependente de coeficientes cuja expressão matemática não é ainda conhecida, reduz a eficácia na geração de diferentes batimetrias e outras simulações numéricas. No entanto, Klein *et al.* (2003) apresentam uma proposta de aproximação com polinómios de 4º grau para a obtenção do valor dos coeficientes, desenvolvendo também uma forma automática do modelo, facilitando a sua aplicação.

Numa análise matemática rápida e simplista e de acordo com a figura 5.4, verifica-se que quando  $\theta$  é igual a  $\beta$ , o valor de  $R$  deveria resultar igual ao de  $R_\theta$ . Para que isto suceda, o somatório dos coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  deveriam ser iguais à unidade, para qualquer valor de  $\beta$ . Pela análise da figura 5.6 rapidamente se verifica que tal não acontece, principalmente para valores elevados do ângulo  $\beta$ . Nestes casos a linha de costa vai recuar em relação ao ponto “fixo” de sotamar.

Numa análise semelhante à realizada para a curva espiral parabólica, verifica-se que o ângulo  $\theta$  que define a posição de máximo recorte do litoral não é constante, mas função de  $\beta$ . Como os coeficientes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são também dependentes de  $\beta$ , o cálculo do recorte litoral máximo é variável e só pode ser obtido por aplicação a situações numéricas concretas.

### 5.1.5 Modelo em Forma de Espiral Logarítmica e Trecho Rectilíneo Tangente

HP (1981b), no plano de obras para o trecho Praia da Barra - Praia de Mira, adopta o modelo que define uma praia em espiral logarítmica próxima do ponto “fixo” de barlamar, onde esta se mostra adequada, mas completa a linha de costa com uma recta tangente à espiral e paralela à crista das ondas dominantes. A linha de costa fica composta por um trecho em espiral e um trecho rectilíneo tangente, conforme se visualiza na figura 5.7.

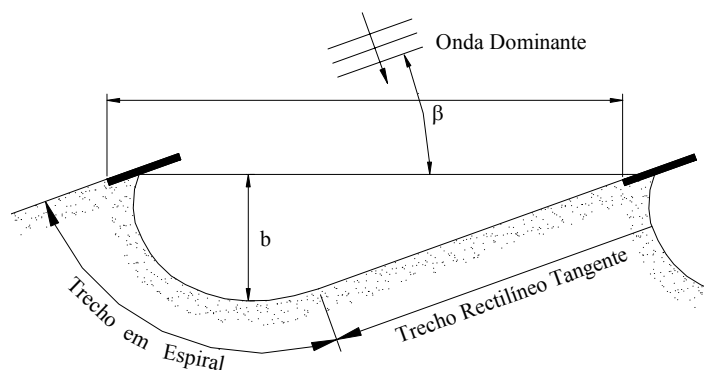


Figura 5.7: Esquema tipo de espiral logarítmica e recta tangente (adaptado de HP, 1981b).

Sendo o trecho em espiral definido de acordo com o exposto no ponto 5.1.2, poder-se-á calcular o “índice de recorte” da linha do litoral ( $r = b/R_0$ ) segundo a função apresentada na figura 5.3 (lado direito). Neste modelo, torna-se indefinida a extensão que deve ser considerada para o trecho rectilíneo, ou de outra forma, onde deverá ser considerado o extremo “fixo” de sotamar, para o qual a linha de costa terá tangente paralela às cristas da onda dominante.

### 5.1.6 Modelo de Pelnard-Considére

A aplicação deste modelo não segue a teoria do equilíbrio estático, mas prevê um transporte longitudinal de sedimentos constante no tempo, bem como um clima de agitação constante.

Pelnard-Considére (1956) apresenta uma solução analítica para a evolução simplificada da linha de costa do lado de barlamar de um esporão ou de um quebramar impermeável ao transporte longitudinal de areias, numa costa sujeita a agitação constante. As experiências laboratoriais de Pelnard-Considére verificaram ainda outras duas situações (a evolução da costa no caso de existir

transposição de areias para sotamar do esporão e a evolução da costa no caso de alimentação instantânea de areias na praia), mas estas não serão agora alvo de análise (Rosati *et al.*, 2002).

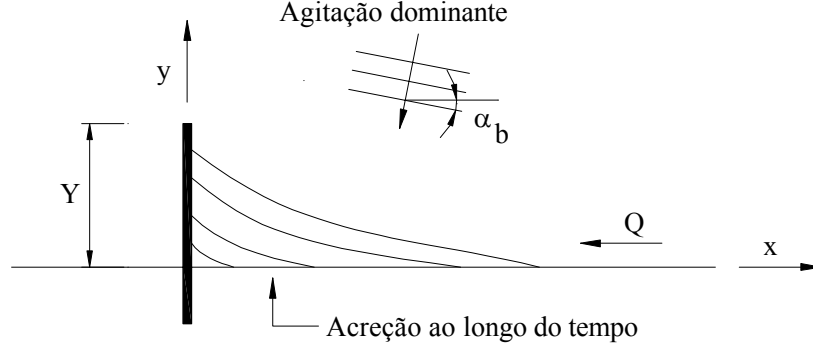


Figura 5.8: Referencial na aplicação do modelo de Pelnard-Considére.

Este modelo define o tempo  $t_f$  como sendo o tempo necessário para o enchimento de um esporão de comprimento  $Y$ . A fórmula que determina esse tempo é apresentada na equação 5.7:

$$t_f = \frac{Y^2 \pi}{4 \varepsilon \tan^2(\alpha_b)} \quad (5.7)$$

Nesta expressão, como se verifica na figura 5.8,  $\alpha_b$  é o ângulo formado entre a linha de rebentação das ondas e a linha de costa, e  $\varepsilon$  pode ser obtido por aplicação da expressão 5.8:

$$\varepsilon = \frac{k H_b^2 C_{gb}}{8} \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \left( \frac{1}{1-n} \right) \left( \frac{1}{B + h_c} \right) \quad (5.8)$$

Para a aplicação da equação 5.8 são definidos os valores de  $k$ , correspondente ao coeficiente adimensional de proporcionalidade entre a razão do potencial de transporte sedimentar longitudinal e a razão de transporte de peso imerso e de  $n$ , indicativo da porosidade dos sedimentos e que deve ser aproximadamente 0.4. Na equação, é necessário ainda conhecer os valores da altura das ondas na rebentação ( $H_b$ ), da altura da berma acima do nível médio da água do mar ( $B$ ) e da profundidade do perfil transversal activo desde o nível médio da água do mar ( $h_c$ ). A velocidade do grupo de ondas na linha de rebentação ( $C_{gb}$ ), pode ser obtida de acordo com a equação 5.9:

$$C_{gb} = \sqrt{gB} = \left( g \frac{H_b}{k_b} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

onde  $k_b$  é o índice de rebentação, que pode agora ser obtido pela relação entre a altura das ondas na rebentação ( $H_b$ ) e a altura da berma acima do nível médio da água do mar ( $B$ ).

Antes do enchimento completo do esporão, a linha de costa pode ser obtida em função do tempo, de acordo com a equação 5.10:

$$y = 2\sqrt{\varepsilon t} \tan(\alpha_b) \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{\left[ -\left( \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right)^2 \right]} - \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}} \right) \right\} \quad \text{para } t < t_f \quad (5.10)$$

Após o enchimento completo do esporão, a linha de costa passa a ser definida de acordo com a equação 5.11:

$$y = Y \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t_2}} \right) \quad \text{para } t > t_f \quad (5.11)$$

onde:

$$t_2 = t - 0.38t_f \quad (5.12)$$

A função  $\operatorname{erfc}()$  é a função complementar da função erro  $\operatorname{erf}()$  e ambas podem ser obtidas por tabelas em livros de matemática. As suas expressões são as seguintes:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \quad (5.13)$$

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) \quad (5.14)$$

### 5.1.7 Discussão

A figura seguinte representa os resultados que se obtiveram na aplicação dos modelos de configuração da linha de costa em equilíbrio estático, a casos da costa Oeste portuguesa localizados em zonas protegidas pela difracção. Admitia-se que por a direcção da ondulação ser mais regular, a configuração da costa obedece a algum destes modelos. Na figura, foram assinaladas as curvas com o melhor ajuste obtido para cada modelo.

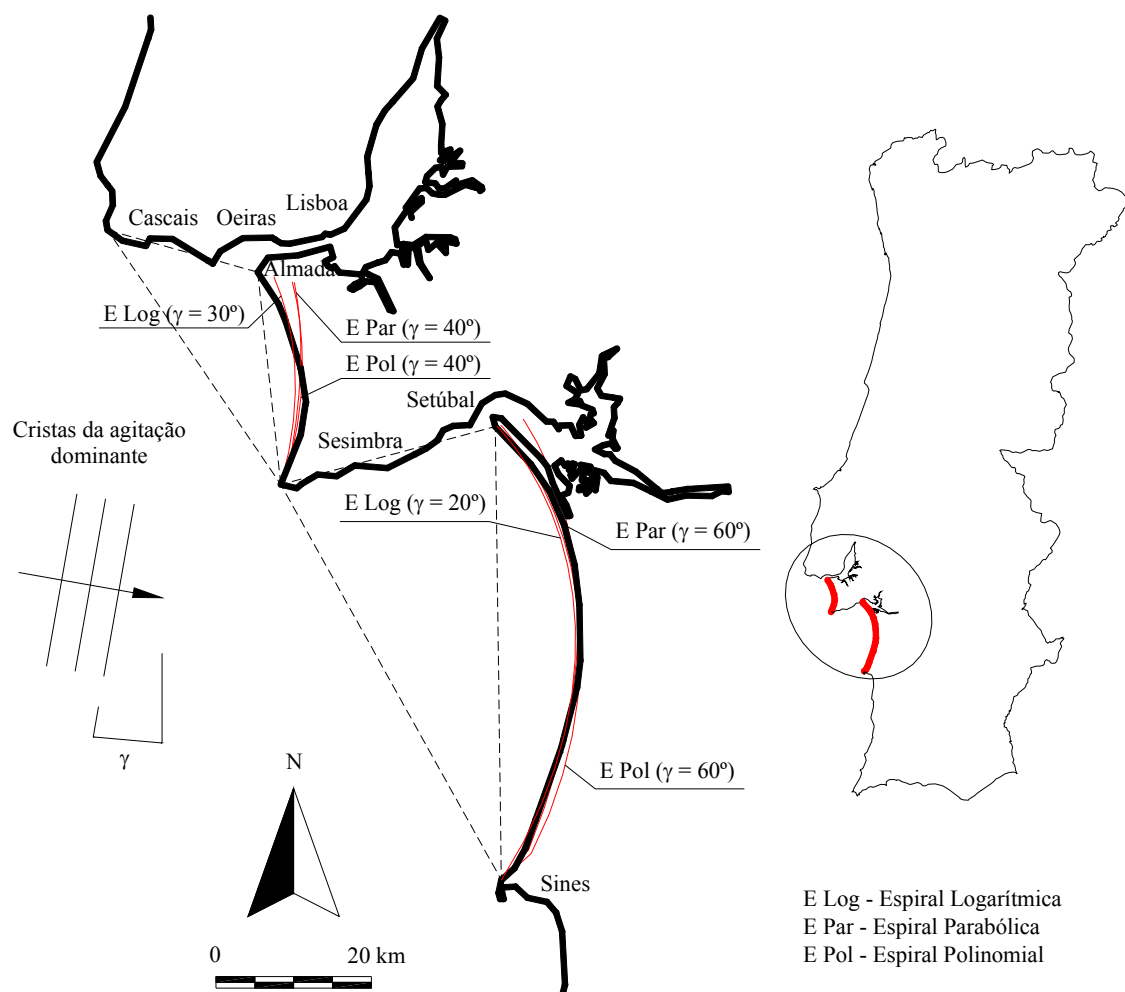


Figura 5.9: Modelos de configuração da linha de costa em equilíbrio estático, aplicados a Sul de Lisboa.

Esta figura serve para lançar a discussão de alguns pontos importantes relativos à aplicação dos modelos expostos, já que é natural que algumas questões se coloquem quanto ao modo de utilização das expressões propostas e quanto à relação das variáveis envolvidas no processo de previsão da configuração da linha de costa.

No capítulo 6 são apresentadas aplicações destes modelos à região a Sul de Aveiro e tentam apresentar-se respostas para algumas das questões aqui levantadas.

Uma primeira questão refere-se à origem do referencial a adoptar para a aplicação das expressões a situações concretas de costa. Yasso (1965) tentou ajustar várias formas de espiral logarítmica e a posição do centro dessas curvas, optimizando a solução e adoptando aquela que conduzia a um menor erro quadrático médio entre a configuração real e a obtida pela curva. Nesta situação, a origem do referencial sofre um processo matemático de cálculo e não corresponde a nenhum ponto com significado físico imediato. Em geral, considera-se para este ponto a cabeça dos quebramares, de esporões ou de promontórios rochosos naturais, onde ocorre a difracção das ondas.

A configuração do esporão, do quebramar ou ponto “fixo” de barlamar é referida por Blankers (1999) como importante na definição da linha de costa, pelo que um quebramar constituído por dois troços de diferentes direcções provavelmente origina resultados diferentes dos verificados para um esporão com troço único. No entanto, os modelos apresentados são independentes da forma que origina o processo de difracção das ondas.

Da mesma forma, o ponto “fixo” de sotamar que permite a definição da linha de controlo também é de difícil definição. Silvester e Hsu (1997) comparam a configuração da costa obtida para diferentes valores do ângulo de incidência das ondas, por alteração da posição do ponto de sotamar. Se a posição onde a linha de costa é tangente à agitação dominante varia, então o comprimento da linha de controlo e o ângulo  $\beta$  também variam. Quanto menor o ângulo  $\beta$ , maior é o valor do comprimento da linha de controlo. O exemplo apresentado por estes autores para o caso de Magnetic Island, na Austrália, mostra pequenas diferenças para os valores de  $\beta$  a oscilar entre  $22.5^\circ \pm 5^\circ$ .

A direcção ou rumo da agitação dominante é adoptada pela generalidade dos modelos propostos. Na realidade, a natureza, não apresenta uma única direcção de ondulação, mas sim várias ao longo do tempo. Nestas situações, parece lógica a adopção de um campo de rumos dominantes que conduzem a uma mancha (provavelmente bastante lata) de resultados possíveis. Na figura 3.7 apresenta-se a rosa de rumos registados na bóia ondógrafo de Leixões entre 1993 e 2003. A definição de probabilidades de ocorrência de diferentes rumos (ao largo e na costa), pode permitir a caracterização probabilística de diferentes zonas de riscos em função da evolução da linha de costa, condicionada a cada rumo. Os rumos que se registam na zona de rebentação da ondulação são diferentes dos registados ao largo devido a fenómenos de refacção e devem ser avaliadas as



diferenças na consideração de uns ou outros. Silvester e Hsu (1997) referem que a agitação com grande significado no transporte sólido é a que se verifica poucos dias após a tempestade, pelo que o rumo de agitação (calma) nessa data será de maior importância.

O transporte litoral longitudinal origina o enchimento do lado de barlamar de um esporão ou quebramar (sendo a obra impermeável). Esta é a base da teoria de Pelnard-Considère e das expressões da linha de costa aí propostas. Parece válida a modelação da linha de costa em função do tempo, principalmente para a avaliação do comportamento da costa após a introdução de uma obra artificial. As mudanças registadas na costa poderão tender para uma determinada posição, que provavelmente será praticamente inalterada depois de determinado período de tempo, que também interessará prever.

O estabelecimento de uma posição de equilíbrio estável na configuração da linha de costa pode não ser viável, supondo que a linha de costa apresenta uma evolução permanente. A resposta a alterações induzidas de forma artificial ou natural, como por exemplo, a subida generalizada do nível médio das águas do mar, vai influenciar a posição da linha de costa, originando alterações ao equilíbrio.

O facto do nível médio das águas do mar subir parece ser uma evidência de que a linha de costa não permanece estável, mas evolui permanentemente no tempo, mesmo que a partir de determinado momento essa evolução seja de pouco significado. Esta evolução poderá talvez ser estimada por aplicação da regra de Bruun, ou desenvolvimentos desta posteriormente verificados. A regra de Bruun é aplicável a perfis transversais em equilíbrio, pelo que se pode assumir que a batimetria poderá ser obtida por aplicação desta regra, depois de conhecida a posição da linha de costa.

Os modelos apresentados não são sensíveis a variações do nível de maré, mas este factor pode ser suficiente para originar diferentes configurações de linha de costa. As diferentes batimetrias e intensidades de agitação podem originar diferentes configurações de linha de costa, inicialmente semelhantes. Os modelos são também indiferentes a estes aspectos.

A batimetria na proximidade da costa tem influência na configuração da linha de costa e presume-se que também evolui para uma situação de equilíbrio. As alterações na batimetria vão condicionar a agitação marítima e também têm influência na granulometria em cada zona da baía. As expressões estudadas, nomeadamente a espiral polinomial, não são claras quanto à cota que define a configuração da linha de costa. Rosati *et al.* (2002) referem que esta pode ser interpretada

como a linha correspondente ao nível médio da água do mar. A refração das ondas varia com a batimetria, pelo que diferentes batimetrias conduzem a uma incidência da ondulação diferente, originando também diferentes configurações da costa (Silvester e Hsu, 1997).

Na projecção de uma configuração de equilíbrio da linha de costa que englobe terreno em erosão, a topografia do terreno adjacente à linha de costa tem influência na configuração que esta toma no equilíbrio. Um terreno aproximadamente plano e de baixa altitude permite uma evolução mais rápida da linha de costa, quando comparada com uma costa idêntica em todas as situações de acção marítima, mas que apresenta um declive pronunciado do terreno. A configuração que resulta em equilíbrio poderá ser diferente.

Um pouco associado a esta questão, surge a caracterização granulométrica das areias. As praias com areias de diferente dimensão, apresentam características hidromorfológicas distintas. A densidade das areias pode ter influência, apesar de ser um parâmetro sem grande oscilação nas zonas costeiras. Estes factores podem ser contabilizados na caracterização do transporte sedimentar longitudinal, mas quando não existe transporte longitudinal as configurações de equilíbrio estático são insensíveis a estas diferenças.

Segundo o conhecimento actual, o equilíbrio estático só é atingido para uma situação de transporte sedimentar nulo. Quando existe um valor constante de deriva sedimentar litoral, poderá ser atingida uma configuração de linha de costa em equilíbrio dinâmico. Nessa situação, o volume de transporte sólido longitudinal terá influência (pelo menos na questão da evolução no tempo) na configuração de equilíbrio dinâmico da linha de costa. Os modelos analisados não apresentam a consideração de variáveis directamente relacionadas com o volume de transporte sólido existente na linha de costa em análise (poderão alguns dos coeficientes ser função implícita desta variável). Os diferentes rumos originam diferentes valores de transporte sedimentar, pelo que a eventual consideração deste parâmetro deverá ser variável em função da direcção da agitação.

Nenhum dos modelos estudados relaciona uma maior alternância dos rumos de agitação com a configuração da linha de costa e os índices de erosão. Não é referido se a alternância do sentido de transporte sólido longitudinal agrava o processo de erosão e aumenta o recuo da linha de costa, ou simplesmente equilibra o volume de sedimentos em ambos os sentidos e reduz a erosão. Admitindo-se que numa costa se verifica um valor médio de capacidade de transporte sensivelmente regular ao longo dos anos, questiona-se se será diferente a configuração duma costa que tenha x metros cúbicos de transporte por ano sempre no mesmo sentido, ou z metros cúbicos

num sentido e y no outro, resultando também x metros cúbicos de transporte litoral ao fim de um ano.

Em termos de acções, os modelos apresentados são dependentes dos rumos de ondulação. No entanto, a capacidade energética da agitação, representada pela altura das ondas incidentes pode originar consequências na configuração da costa. O mesmo pode acontecer em função da frequência da ondulação, ou seja, para situações de diferentes períodos de onda. A altura e frequência das ondas incidentes caracterizam a energia da acção sobre a linha de costa. A energia da agitação marítima que provoca a modelação da costa deve ter influência na velocidade com que as mudanças de configuração têm lugar. A configuração final de equilíbrio terá alguma probabilidade de ser semelhante, mas os modelos analisados nada indicam quanto a esta questão.

São ainda questionáveis a consideração de um esporão ou um quebramar como um ponto fixo da costa, ou uma linha de referência “fixa”. As distâncias a barlar ou sotamar de outros pontos fixos podem distinguir duas situações, mesmo que todas as outras variáveis coincidam. Este aspecto pode ser relevante no dimensionamento de um campo de esporões, tal como a consideração dos pontos “fixos” naturais mais próximos, mesmos que estes distem quilómetros das obras de defesa a projectar.

Pelas considerações apresentadas, são ainda imensas as dúvidas quanto a configurações da linha de costa. Pelo carácter aleatório de muitos dos factores envolvidos, não é possível prever uma linha final como solução, mas possivelmente uma faixa provável para a sua localização. Devido a este facto, será então pouco lógico entrar com demasiados factores na definição da configuração da costa, sendo talvez mais importante a caracterização com rigor dos que se considerarem fundamentais no fenómeno da evolução da linha de costa. A projecção de cenários em função de configurações extremas de todas as alternativas estudadas pode ser uma abordagem a seguir.

Na perspectiva de um modelo de dimensão viável, mas mais próximo de situações reais e com o objectivo de tentar ajudar os projectistas de obras de defesa a localizar essas mesmas obras e a otimizar as suas dimensões, conjuntamente com a tentativa de permitir um planeamento da orla costeira em função do posicionamento da linha de costa, foi desenvolvido o modelo numérico apresentado na secção 5.3 deste capítulo. Desta forma, tenta-se também dar resposta às questões aqui levantadas. Para introduzir esse modelo, na secção 5.2 são abordados sumariamente alguns aspectos da modelação numérica da linha de costa, por análise generalista de outros modelos.

## 5.2 Modelação Numérica da Linha de Costa

Actualmente, está estabelecido que a modelação é indispensável, não só para compreender e prever a dinâmica dos sistemas costeiros, mas também para uma efectiva tomada de decisões e eficiente solução dos complexos problemas dos ambientes costeiros. Progressivamente cada vez mais sofisticados, os modelos conduzem a avanços na compreensão das várias características costeiras e dos processos físicos envolvidos (Lakhan, 2003).

Não existe ainda um modelo universal para análise e previsão da evolução da costa numa escala de dezenas de anos. Dependendo da natureza do problema e dos objectivos do projecto, existe um número alargado de modelos com abordagens distintas e com pontos de vista específicos (Hanson *et al.*, 1999). Em geral, o funcionamento dos modelos baseia-se no cálculo do transporte sedimentar e na aplicação da equação de continuidade aos volumes de areia movimentados (Vicente e Clímaco, 2003).

A gestão e planeamento da costa trabalha prioritariamente com escalas temporais de anos ou décadas, em trechos com dezenas ou centenas de quilómetros e com larguras transversais que podem também ultrapassar a dezena de quilómetros. A utilização dos modelos numéricos é uma técnica poderosa de apoio, auxiliando na organização de elementos e na avaliação de soluções em diferentes cenários. A generalidade dos modelos actuais são validados em situações esquemáticas e quando aplicados a casos reais, são calibrados com base em dados específicos. Depois de calibrados, os modelos são aplicados de forma diferenciada, em situações de análise, avaliação de cenários e previsão de condições futuras (Hanson *et al.*, 1999).

Um dos modelos mais utilizados e simples para prever a evolução da linha de costa, o modelo de uma linha, assume que o perfil de fundo se mantém constante mas pode ser deslocado na direcção perpendicular à costa como o resultado dos fenómenos de erosão ou acreção (Silva, 2001). Como referem Vicente e Clímaco (2003), os modelos unidimensionais baseiam-se na abordagem estabelecida por Pelnard-Considère já referida e aplicada ao enchimento de esporões. Depois de 1956 foram diversos os autores a apresentar soluções analíticas, tendo sido iniciado o tratamento numérico com Price, Tomlinson e Willis, em 1972. Posteriormente, este tipo de tratamento recebeu um forte desenvolvimento com Hanson. Desde 1987, os modelos numéricos são utilizados com frequência em estudos de engenharia costeira.

Os modelos de múltiplas linhas foram desenvolvidos para descrever o movimento de contornos a determinadas profundidades, de forma análoga aos modelos de uma linha. Apesar do detalhe adicional, estes modelos não obtiveram sucesso devido à dificuldade de relacionar de forma realista o transporte transversal e a distribuição transversal do transporte longitudinal. Estes modelos requerem mais calibração e não resultam num acréscimo significativo de resultados (Hanson *et al.*, 1999).

Os modelos que descrevem o escoamento e o transporte sedimentar no plano horizontal devem ser considerados nos problemas em que as duas dimensões horizontais não podem ser separadas de acordo com as escalas dos processos morfológicos. Exemplos destas situações são a evolução da morfologia de fundo junto a estruturas e nas embocaduras de estuários (Silva, 2001).

Mais recentemente têm sido propostas formulações quase tridimensionais, que descrevem também a estrutura vertical do escoamento e da concentração de sedimentos em suspensão. Estes modelos são bastante mais pesados do ponto de vista computacional (Silva, 2001).

Na secção 5.3 será apresentado o modelo desenvolvido neste trabalho, que pretende descrever o comportamento morfológico a nível tridimensional, mas que em diversas abordagens se assemelha a um modelo simples de uma linha. Passam-se a referir os principais aspectos dos modelos de uma linha, que são os mais utilizados na previsão da evolução da linha de costa.

Nos modelos numéricos unidimensionais, a evolução da costa é representada pelas variações de posição da linha de água. O seu funcionamento baseia-se no cálculo do transporte litoral, efectuado a partir das características das ondas na rebentação e na aplicação da equação de continuidade dos volumes de areia movimentados. A variação da posição da linha de água é calculada em cada célula em que se divide o trecho de praia, a partir das diferenças de caudal sólido que nela penetram e a abandonam, num certo intervalo de tempo e admitindo-se que o perfil transversal no seu avanço ou recuo se desloca paralelamente a si próprio, sem alteração de forma (Vicente e Clímaco, 2003).

As alterações na posição da linha de costa são devidas a variações espaciais e temporais nos volumes de transporte sólido longitudinal, pelo que as situações de tendência sistemática na alteração da posição são melhor representadas (exemplo de erosão a sotamar de um esporão). Os efeitos do transporte transversal são assumidos nulos ao longo de um período extenso de cálculo. Tradicionalmente, o transporte transversal e a evolução do perfil de praia associado não são

descritos em termos de modelação de anos ou décadas, já que ainda não existe capacidade de reproduzir uma evolução realista nesta escala temporal (Hanson *et al.*, 1999).

### 5.2.1 GENESIS

O modelo GENESIS (Generalized Model for Simulation Shoreline Change) foi desenvolvido pelo U.S. Army's Corps of Engineers. Este modelo foi criado para calcular as alterações da linha de costa causadas pelas acções das ondas. O modelo assume que o perfil transversal se mantém inalterado, permitindo que a evolução da praia seja descrita unicamente em termos da posição da linha de costa. A aplicação do modelo é possível num número diversificado de situações, envolvendo esporões, quebra-mares, quebra-mares destacados, muros e revestimentos longitudinais aderentes e alimentações de praia. É possível simular a transposição de areias na frente dos esporões ou através destes, por permeabilidade (Hanson e Kraus, 1989).

Este modelo é adequado para extensões de costa entre 1 km e 100 km e o tempo de simulação deve situar-se entre 1 mês e 100 meses. O modelo GENESIS foi maturando ao longo dos tempos, por aplicação a numerosos tipos de projectos, no entanto traduz os conhecimentos actuais, que de qualquer forma podem ser melhorados e adicionados ao modo de cálculo (Hanson e Kraus, 1989).

A maior utilidade do GENESIS é na modelação da resposta da costa a estruturas aí introduzidas, por variação temporal e espacial do transporte longitudinal de sedimentos. O transporte transversal não é simulado. O programa calcula melhor a evolução da linha de costa desde um estado de equilíbrio até outro, depois de uma intervenção na costa (Hanson e Kraus, 1991).

Como já se referiu, este é um modelo de uma linha, já que se admite que a forma do perfil transversal se mantém constante, existindo apenas movimentos de translação da posição da linha de costa para terra ou para o mar. Este programa pode auxiliar no encontrar das soluções de engenharia mais adequadas em termos sócio-económicos, para fazer face aos problemas de protecção da costa. No entanto, a necessidade de dados físicos é fundamental na calibração e verificação do comportamento do modelo.

Os dados são introduzidos pela posição discreta da linha de costa (pontos espaçados de 25 m, 50 m ou 100 m). Na direcção transversal não é definida grelha de pontos. Os dados de batimetria e características do perfil transversal são usados no GENESIS para definir a altura de berma, a

profundidade de fecho, a inclinação do perfil de praia e ainda a propagação das ondas. Os sedimentos são transportados entre duas cotas bem definidas do perfil transversal, correspondentes à profundidade de fecho e ao topo da berma activa. Seguindo a teoria de Pelnard-Considére, a linha de costa responde à acção das ondas por movimentos do perfil de praia paralelamente ao próprio perfil, sem que altere a sua forma.

Para a definição da área de trabalho, se possível devem ser considerados os limites correspondentes a uma célula litoral sedimentar, onde os fluxos na fronteira sejam conhecidos ou bem definidos. O volume de sedimentos em circulação é calculado em função da fórmula CERC, mas com uma correcção para o comportamento das ondas por difracção na proximidade das estruturas.

Para a determinação de algumas das grandezas necessárias ao cálculo do volume em transporte, tais como a profundidade de rebentação, é aplicado o perfil de equilíbrio de Dean (forma monotónica). O programa utiliza um valor único da profundidade de fecho para toda a costa, apesar de na proximidade de grandes estruturas, como quebramares e esporões extensos, o clima de agitação ser mais calmo e consequentemente a profundidade de fecho ser menor.

O programa utiliza dados de onda em intervalos iguais, normalmente entre 6 h e 24 h. A transformação das características da onda desde o largo até à costa pode ser efectuada por um modelo interno e simples ou por um modelo externo que trabalha as batimetrias mais complexas. O GENESIS permite mais que uma fonte de ondas a actuar em simultâneo, como por exemplo a ondulação e a vaga gerada por ventos locais.

O modelo prevê a simetria de evoluções numa situação de erosão e acreção, mas como a evolução dos perfis de erosão e acreção não é idêntica, este pressuposto constitui uma limitação.

No GENESIS há a necessidade de assumir um perfil de equilíbrio obrigando à definição da dimensão das areias e não sendo necessária a caracterização topográfica das regiões submersas ao longo do cálculo.

### **5.2.2 LITMOD**

As bases do modelo LITMOD foram estabelecidas no LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), em 1990. Este modelo segue a estruturação do GENESIS e beneficiou já de diversos

desenvolvimentos, determinados por exigências de aplicação a casos reais de estudos de engenharia costeira (Vicente e Clímaco, 2003).

Este modelo baseia-se em duas hipóteses principais. A primeira admite que o perfil de praia não se altera durante os processos de erosão e assoreamento, conduzindo a recuos e avanços da linha de costa paralelos do perfil, desde a berma da praia até à cota limite dos fundos. É conhecido que as situações de acumulação ou recuo da linha de costa determinadas por obras ou saliências naturais influenciam a forma do perfil da praia, mas não existem correlações quantitativas de aplicação geral que permitam ter em conta essas influências nos cálculos de evolução. A segunda hipótese considera que o transporte sólido longitudinal é o factor determinante na evolução geral da costa (Vicente e Clímaco, 2003).

A sequência de cálculo do modelo depende das condições iniciais da linha de água e dos caudais sólidos nas células extremas. Eventualmente podem ainda ser considerados caudais de alimentação, que se forem negativos correspondem a extracções de areias. Também são dados do cálculo os valores que caracterizam a agitação numa batimetria de aproximação, após a aplicação de um modelo de refração, ou de refração e de difracção, às características da onda ao largo (período, altura e rumo). A agitação na batimetria de aproximação pode ser considerada distinta em diversos pontos ao longo da costa e é com base nestes valores que se obtêm os correspondentes valores na rebentação (Vicente e Clímaco, 2003).

### **5.3 Modelo LTC (Long-Term Configuration)**

Este programa foi elaborado no âmbito da presente dissertação, como um contributo para uma melhor compreensão da capacidade de previsão da evolução da linha de costa ao longo dos tempos.

O programa está elaborado para praias arenosas (sedimentos não coesivos). Considera-se que o transporte sedimentar longitudinal, condicionado e/ou controlado pelas ondas, correntes, ventos, níveis de água, natureza dos sedimentos e sua fonte, juntamente com as condições fronteira, nos extremos da grelha modelada são as principais causas das alterações na zona costeira.

O programa poderá apoiar o processo de planeamento, na medida em que possibilita a projecção de cenários de evolução da linha de costa. O programa pode também apoiar a escolha de soluções de engenharia mais adequadas em termos técnicos, ambientais e sócio-económicos, para fazer face aos



problemas de defesa da costa. Os resultados do programa só podem ser entendidos como indicadores do comportamento de interação entre a água do mar e o meio terrestre, na fronteira entre estes dois sistemas.

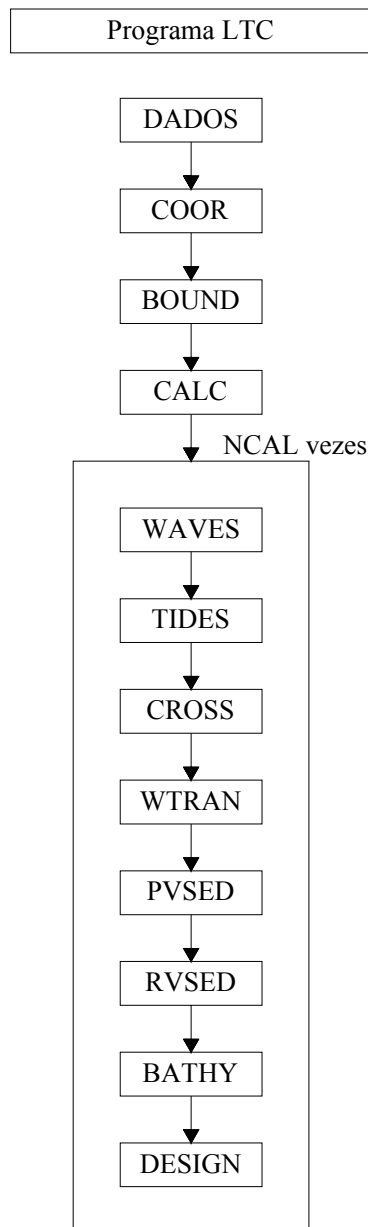


Figura 5.10: Organograma da sequência de cálculo do modelo LTC.

### 5.3.1 Introdução

O programa designado de LTC (Long-Term Configuration) foi elaborado para tentar prever o comportamento da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do

tempo (larga escala), por análise de uma série de conceitos associados ao transporte de sedimentos, mas a que ainda corresponde um grau de incerteza muito elevado (como foi evidenciado em todo o trabalho exposto até agora).

Seguindo os modelos existentes (Hanson e Kraus, 1989 ou Vicente e Clímaco, 2003), a formulação de base consiste no balanço de volumes, pelo que se considera a equação de continuidade dos volumes de areia envolvidos no processo. Admite-se que a variação do volume de areia, ao longo de um comprimento infinitesimal da linha de costa é igual à variação de caudal sólido em transporte nesse comprimento, adicionada ou subtraída de eventuais caudais sólidos exteriores (fontes aluvionares, alimentações artificiais, dragagens, extracções de areias, etc.) distribuídas por esse comprimento infinitesimal, num instante de tempo  $dt$ . A expressão 5.15 traduz o exposto:

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \left( \frac{\partial Q}{\partial y} + q_{ext} \right) dt \quad (5.15)$$

Discretizando o tempo em intervalos  $\Delta t$ , a análise ao longo da linha de costa para trechos de comprimento  $\Delta y$ , permite relacionar a variação de volume com a variação no tempo dos caudais sólidos em transporte:

$$\Delta V = (Q_i - Q_{i-1} + Q_{ext}) \Delta t = (\Delta Q + Q_{ext}) \Delta t \quad (5.16)$$

Considera-se que  $Q_{ext} = q_{ext} \Delta y$  e que a variação do volume de areia ( $\Delta V$ ) no comprimento  $\Delta y$  é distribuída uniformemente em toda a largura activa do perfil transversal, representando uma variação na cota dos pontos do perfil igual a  $\Delta z$ , de acordo com a figura 5.11. Assim, a equação 5.17 permite o cálculo da alteração no perfil transversal representativo do trecho  $\Delta y$ , por variação do volume de areia  $\Delta V$ .

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{(\text{largura activa}) \Delta y} \quad (5.17)$$

A variação do caudal sólido em transporte no comprimento  $\Delta y$  resulta da diferença entre os volumes que entram ( $Q_i$ ) e que saem ( $Q_{i-1}$ ) do trecho de comprimento  $\Delta y$  em cada intervalo de tempo  $\Delta t$ . Como já foi referido anteriormente, os volumes sólidos em transporte no intervalo  $\Delta t$  dependem essencialmente das características da onda na rebentação (altura e orientação) sendo

calculados para cada comprimento de linha de costa  $\Delta y$ , de acordo com o critério definido pelo utilizador, recorrendo a uma das expressões apresentadas e analisadas na secção 4.4.

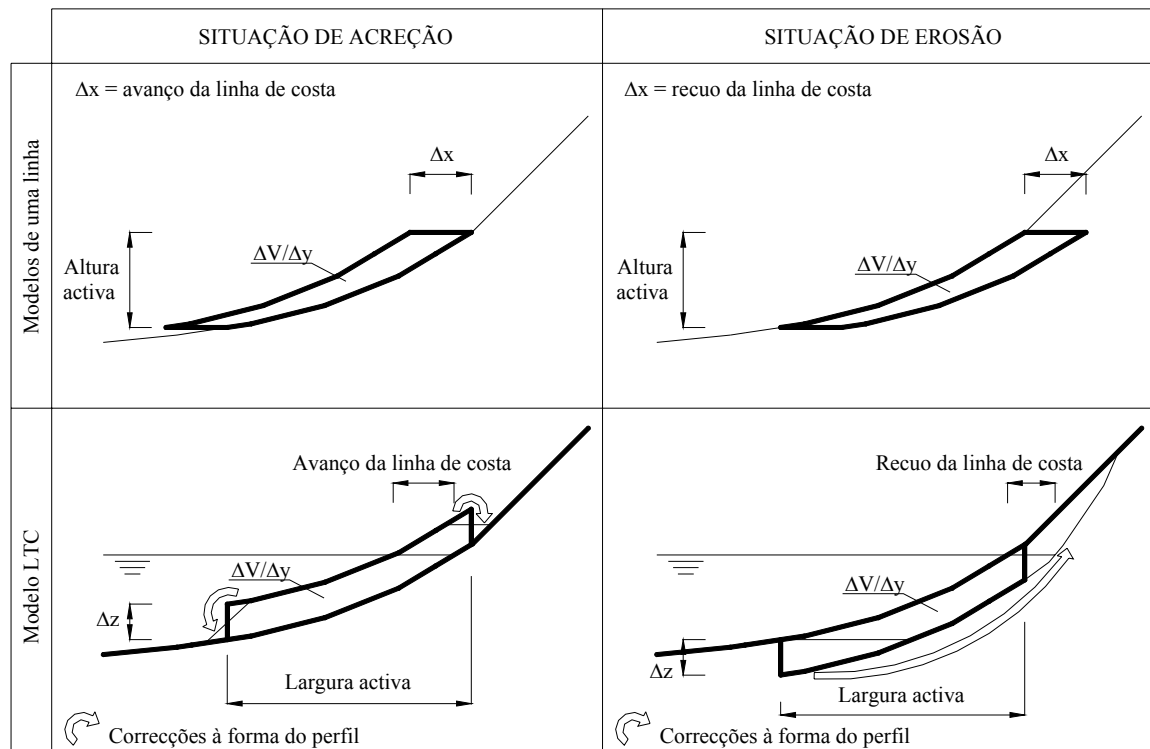


Figura 5.11: Representação esquemática da formulação de base nos modelos de uma linha e no modelo LTC.

Na figura 5.11 representa-se uma das principais diferenças entre o modelo LTC e os modelos de uma linha, onde qualquer ponto do perfil activo é suficiente para caracterizar a alteração da posição da linha de costa. No modelo LTC procede-se à variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil activo, mas procede-se ao ajuste do perfil activo com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa além de depender de  $\Delta z$ , depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal.

Em situação de acreção, quando o talude de cálculo tem uma inclinação superior ao ângulo de atrito que caracteriza as areias, é considerado o deslizamento das areias para zonas mais profundas. Na zona emersa, a acumulação de sedimentos prolonga a praia na horizontal, ou com um declive definido pelo utilizador. Em situações de erosão, para evitar a escavação continuada na zona da largura activa, o volume que aprofundaria o perfil é na prática subtraído da zona mais alta do mesmo. Nesta zona, caso existam taludes de cálculo com inclinação superior ao ângulo de atrito das areias, dá-se também o deslizamento, com consequente correcção das formas do perfil (figura 5.11). Em qualquer das situações citadas, na correcção da forma do perfil, é mantida a

variação de volume, pelo que se respeita sempre a equação de continuidade dos volumes. Estes processos de correcção da forma dos perfis transversais estão ainda pouco estudados e devem ser continuamente verificados. Note-se que o intervalo de tempo  $\Delta t$  a considerar para cada iteração do cálculo não deve ser muito grande para que não resultem variações de volume elevadas que possam introduzir instabilidade no cálculo.

Para facilitar alterações e potenciar alternativas em métodos de cálculo, o programa é composto por subrotinas relativamente diferenciadas e de pequena extensão, aumentando a simplicidade e compreensão de cada uma delas. O programa principal recorre a estas subrotinas ao longo do processo de cálculo automático. Passam-se a apresentar as subrotinas em detalhe, procedendo-se de seguida à exposição de exemplos teóricos de aplicação, para análise do comportamento e sensibilidade do modelo.

### **5.3.2 Descrição das Subrotinas**

#### MAIN - Corpo principal do programa

Esta subrotina corresponde ao corpo principal do programa, onde são efectuadas as principais operações necessárias na programação, tais como a abertura e fecho de ficheiros de dados e de resultados e o recurso às diversas subrotinas de cálculo. Junto com o corpo principal do programa, estão ainda definidas duas funções a que o programa vai recorrendo ao longo do cálculo. As funções são necessárias para o cálculo de expoentes e para o cálculo da profundidade de fecho, dependendo do tipo de formulação desejada.

No corpo principal do programa, começa-se por proceder à abertura dos ficheiros envolvidos no cálculo, nomeadamente os ficheiros de dados (“data.dat”, “coord.dat”, “bound.dat”, “wave.dat” e “tide.dat”), os ficheiros de resultados numéricos (“resul.res”, “actio.res” e “volum.res”) e os ficheiros correspondentes a saídas gráficas (“plant.dxf”, “cross.dxf” e “final.dxf”). Os ficheiros “movie.txt” e “movieleg.txt” possibilitam o recurso a outra aplicação designada de VCL (View Coastal Line), para a visualização gráfica da evolução da linha de costa ao longo do tempo.

No início do cálculo é enviada para o ficheiro “resul.res” a informação relativa à data e hora em que o programa é iniciado. Após este procedimento inicia-se o processo de cálculo

propriamente dito, com o recurso a subrotinas de acordo com o fluxograma exposto na figura 5.10. Depois de recorrer às primeiras quatro subrotinas, o cálculo das restantes subrotinas repete-se NCAL vezes.

Para a primeira iteração do cálculo é escrito o cabeçalho do ficheiro “movie.txt”, bem como a configuração inicial da costa. Ainda na primeira iteração, a legenda da saída gráfica é escrita no ficheiro “movieleg.txt”. A linha de costa é definida em relação ao nível médio das águas do mar, pelo que este procedimento acontece logo a seguir à execução da subrotina CROSS. Depois da subrotina BATHY vão sendo enviadas para o ficheiro “movie.txt” as sucessivas configurações da linha de costa ao longo do tempo de cálculo.

Por último, e já depois da conclusão do processo iterativo, é escrita a hora em que o cálculo terminou no ficheiro “resul.res” e são dadas as instruções que encerram os ficheiros de saída gráfica.

#### DADOS - Leitura de dados gerais

Esta subrotina destina-se à introdução de dados gerais, relativos a características da água do mar, a características dos sedimentos, a características de inclinação dos taludes de erosão e acreção, a tempos de cálculo e quantidades de saídas gráficas pretendidas e a códigos de tipos de formulações desejadas. Estes dados são obtidos por leitura do ficheiro “data.dat”. Após a leitura dos dados, os mesmos são imediatamente apresentados no ficheiro de resultados designado de “resul.res”.

Os dados a introduzir são os que se indicam de seguida, correspondendo a seis linhas de um ficheiro de texto:

G	ROA	NIU	KB	
ROS	D50	N	KK	
FI	INCI	INCS	DLP	
NH	NCAL	SPAC	DPRF	PRF1
TCD	TPVC			
TWAV	TAT	TMT	SLR	

Os dados da 1ª linha referem-se a características que se podem associar com a água do mar:

- G - aceleração da gravidade ( $9.81 \text{ m/s}^2$ );
- ROA - massa volúmica da água do mar (normalmente considerado como  $1027 \text{ kg/m}^3$ );
- NIU - coeficiente de viscosidade cinemática da água (normalmente considerado  $1.36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ );
- KB - coeficiente ou índice de rebentação das ondas (normalmente assumido como 0.78).

Os dados da 2ª linha são referentes a características dos sedimentos:

- ROS - massa volúmica dos sedimentos (normalmente considerado como  $2650 \text{ kg/m}^3$ );
- D50 - diâmetro médio dos grãos dos sedimentos, expresso em milímetros;
- N - porosidade dos sedimentos (normalmente assumida como 0.4);
- KK - coeficiente de proporcionalidade a utilizar na fórmula CERC e que permite a calibração dos volumes de transporte de sedimentos (usualmente assumido igual a 0.39).

Os dados da 3ª linha são referentes a características de inclinação de taludes:

- FI - ângulo de atrito dos sedimentos em repouso, para verificação das condições de ruptura dos taludes (graus);
- INCI - inclinação mínima do talude submerso, importante na evolução dos perfis em erosão. Se este valor for considerado negativo funciona como um código e então, para cada instante é adoptada uma inclinação de acordo com o perfil de equilíbrio e com a profundidade de fecho. Este parâmetro impede a formação de valas profundas quando os perfis estão permanentemente sujeitos a erosão;
- INCS - inclinação mínima do talude emerso, importante nos perfis em acreção;
- DLP - deslocamento permitido no ponto de fecho do perfil activo em caso de erosão, modelando eventuais agravamentos de erosão por perda de sedimentos para grandes profundidades.

Na 4ª linha, são introduzidos dados referentes ao tempo de cálculo e número de saída de resultados:

- NH - número de horas em que se assume o mesmo regime de ondas e marés (por questões de volumes de transporte e tempo de cálculo, deve ser adoptada uma hora);
- NCAL - número de vezes que é efectuado o cálculo. Este número multiplicado pelo NH escolhido exprime o tempo de simulação;

SPAC - espaçamento temporal entre as saídas gráficas (SPAC x NH horas);

DPRF - espaçamento, expresso em metros, dos perfis transversais a representar na saída gráfica;

PRF1 - primeiro perfil transversal a ser representado, expresso pelo número da sua posição, definido desde Sul;

Na 5ª linha são escolhidos os tipos de cálculo pretendidos para a profundidade de fecho e para o volume potencial de transporte de sedimentos:

TCD - Código do tipo de fórmula usada no cálculo da profundidade de fecho (1, 2):

1 - Fórmula de Hallermeier;

2 - Fórmula de Birkemeier;

TPVC - Código do tipo de fórmula usada no cálculo do volume potencial (1, 2):

1 - Fórmula CERC;

2 - Fórmula de Kamphuis.

Na 6ª linha, definem-se os tipos de geração de ondas e geração de marés (astronómicas e meteorológicas), bem como a taxa de elevação do nível do mar devido ao aquecimento generalizado do globo terrestre:

TWAV - código do tipo de dados de ondulação (0, 1, 2):

0 - onda de características constantes ao longo de todo o processo de cálculo;

1 - ano típico de agitação, definido em termos de probabilidade de ocorrência de classes de altura significativa e de classes de rumos de proveniência da agitação;

2 - clima de agitação aleatório, definido entre dois limites de alturas de onda e quadrante de proveniência das ondas;

TAT - código do tipo de dados de maré astronómica (0, 1):

0 - o nível das águas do mar mantém-se fixo;

1 - o nível das águas do mar é variável;

TMT - código do tipo de dados de maré meteorológica (0, 1, 2):

0 - o nível das águas do mar mantém-se fixo;

1 - o nível das águas do mar varia aleatoriamente entre dois limites previamente definidos;

2 - o nível das águas do mar varia aleatoriamente entre limites previamente definidos, mas respeitando uma correspondência com as alturas de onda verificadas no mesmo momento de cálculo;

SLR - taxa de elevação do nível do mar, expresso em metros por ano.

COOR - Leitura dos dados de altimetria

Nesta subrotina procede-se à leitura da topografia na malha de pontos da grelha modelada. Após a leitura destes dados, é enviada a informação que caracteriza a malha de pontos e a área a modelar para o ficheiro “resul.res” e a grelha de pontos é marcada nos ficheiros de saída gráfica “plant.dxf” e “final.dxf”.

A figura 5.11 auxilia a compreensão da forma de armazenamento da informação da grelha e do processamento de cálculo. Na figura é indicado o referencial utilizado, bem como a avaliação dos volumes em transporte, fundamentais para determinar se existe erosão ou acreção em cada perfil e em cada instante de cálculo.

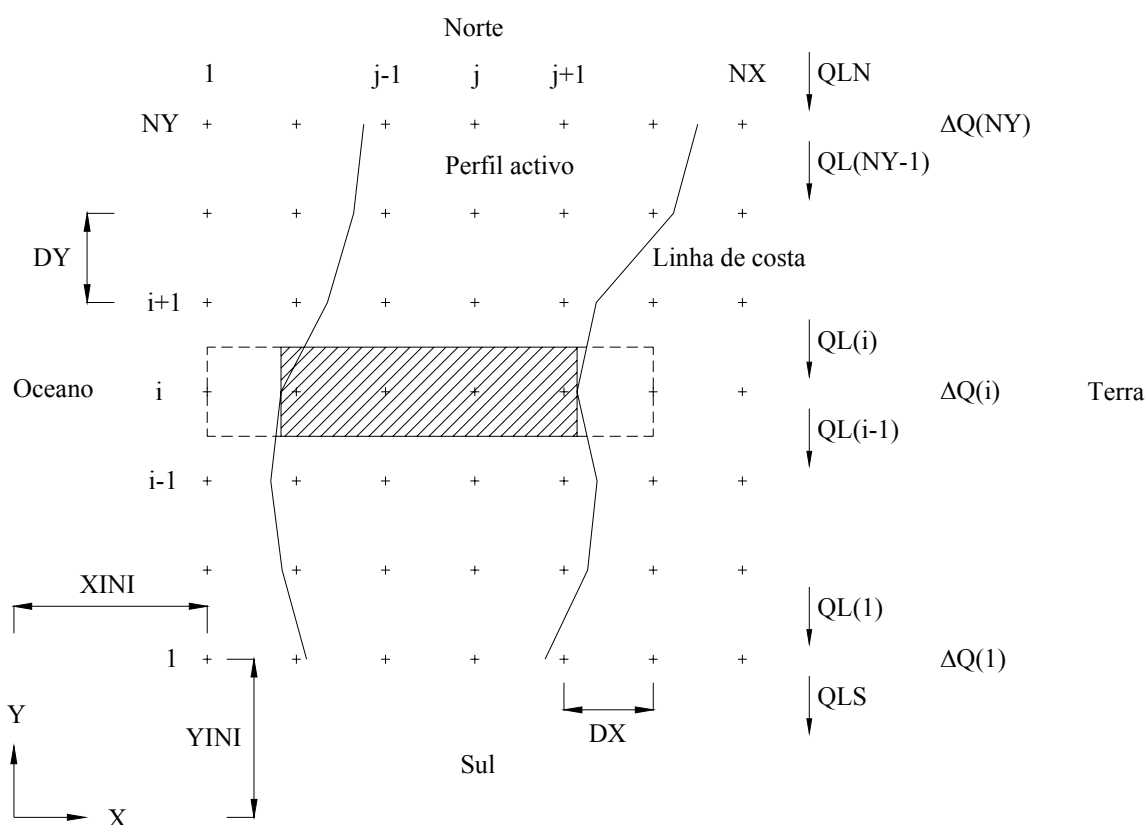


Figura 5.12: Esquema com as características de referência do modelo LTC.

O ficheiro de texto com os dados de coordenadas é o “coord.dat” e neste ficheiro deve ser colocada a seguinte informação:

NX	NY	DX	DY	XINI	YINI
----	----	----	----	------	------



COD	
Matriz de NX x NY valores	
NX e NY	- número de pontos da grelha de trabalho, nas direcções XX e YY respectivamente;
DX e DY	- espaçamento entre os pontos da grelha, nas direcções XX e YY respectivamente (expressos em metros). Não é possível definir a malha com mais que um espaçamento em cada direcção, no entanto em cada direcção os valores podem ser diferentes;
XINI e YINI	- coordenadas em metros do ponto situado no canto inferior esquerdo da malha (ponto localizado mais a Sudoeste).
COD	<p>- é o código que permite definir a sequência na leitura das coordenadas. Após esta linha, devem existir NY ou NX linhas, cada uma com NX ou NY valores respectivamente, correspondentes à cota ZZ referida ao zero hidrográfico e expressa em metros, sendo negativas as cotas submersas. O número de cotas a introduzir corresponde portanto a (NX x NY) valores:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1 - a introdução das cotas dos pontos deve ser feita sucessivamente de Oeste para Este (NX valores) e de Norte para Sul (NY vezes);</li> <li>2 - a introdução das cotas dos pontos deve ser feita sucessivamente de Oeste para Este (NX valores) e de Sul para Norte (NY vezes);</li> <li>3 - a introdução das cotas dos pontos deve ser feita sucessivamente de Norte para Sul (NY valores) e de Oeste para Este (NX vezes);</li> <li>4 - a introdução das cotas dos pontos deve ser feita sucessivamente de Sul para Norte (NY valores) e de Oeste para Este (NX vezes).</li> </ol>

#### BOUND - Definição de condições fronteira

Nesta subrotina são introduzidas as interações da grelha modelada com o meio exterior, através da leitura de condições nas fronteiras. Assim, além de se identificarem as condições de transporte sedimentar nas fronteiras Norte e Sul da grelha modelada, são contabilizadas e descritas outras eventuais condições, tais como, fontes aluvionares pontuais, alimentações artificiais de areias em área e instantes definidos, esporões e quebramares e/ou protecções longitudinais aderentes.

A subrotina começa por efectuar a leitura do ficheiro de dados “bound.dat”, onde estão descritas duas linhas de texto com os seguintes valores:

NORT	VOLN	SOUT	VOLS
NRIV	NAN	NGBW	NLWD

As condições nas fronteiras da grelha modelada são definidas de acordo com a 1ª linha:

NORT - Código de valores para o volume de sedimentos na fronteira Norte (0, 1, 2):

0 - volume fixo a entrar ou a sair da secção;

1 - taxa fixa de erosão ou acreção na secção;

2 - extrapolação das condições na vizinhança da fronteira, baseado na média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes à fronteira Norte;

VOLN - se NORT = 0, representa o volume de sedimentos a entrar pela fronteira Norte ( $\text{m}^3/\text{NH}$ ). Volume positivo se o sentido for de Norte para Sul (entrada de volume de sedimentos no modelo). No caso de NORT = 1, representa a variação de volume na secção, em cada iteração do cálculo. Neste caso, se VOLN = 0, quer dizer que a secção da fronteira se mantém inalterada durante o cálculo. Se NORT = 2, o valor de VOLN é adicionado à média dos volumes em transporte nas secções adjacentes;

SOUT - Código de valores para o volume de sedimentos na fronteira Sul (0, 1, 2):

0 - volume fixo a entrar ou a sair da secção;

1 - taxa fixa de erosão ou acreção na secção;

2 - extrapolação das condições na vizinhança da fronteira, baseado na média dos volumes em transporte nas três secções adjacentes à fronteira Sul;

VOLS - se SOUT = 0, representa o volume de sedimentos a sair pela fronteira Sul ( $\text{m}^3/\text{NH}$ ). Volume positivo se o sentido for de Norte para Sul (saída de volume de sedimentos no modelo). No caso de SOUT = 1, representa a variação de volume na secção, em cada iteração do cálculo. Neste caso, se VOLS = 0, quer dizer que a secção da fronteira se mantém inalterada durante o cálculo. Se SOUT = 2, o valor de VOLS é adicionado à média dos volumes em transporte nas secções adjacentes.

Após a leitura destes dados é imediatamente efectuada a escrita do tipo de condições fronteira a Norte e a Sul da grelha modelada. Essa descrição é feita no ficheiro “resul.res”.

Se existirem fontes aluvionares pontuais, como um rio a descarregar sedimentos na área modelada, será necessário proceder à leitura de dois parâmetros. O primeiro corresponderá à posição do perfil transversal onde se processa essa alimentação e o segundo corresponde ao volume de sedimentos, expresso em  $\text{m}^3/\text{NH}$ . Note-se que o caudal de sedimentos a entrar na grelha modelada por esta forma é constante ao longo de todo o processo de cálculo.

Para descrever cada caso de alimentação artificial são necessários sete parâmetros, relacionados com a área abrangida, período da alimentação e volume introduzido. Assim, são sucessivamente introduzidos no ficheiro “bound.dat” o valor do volume total da alimentação artificial, os instantes em que começa e termina a alimentação artificial (pode ser instantânea, se os dois instantes introduzidos forem os mesmos) e a posição XX e YY dos pontos mais a Sudoeste e a Nordeste da área de alimentação. A alimentação artificial traduz-se depois numa elevação das cotas, comum a todos os pontos abrangidos.

Todas as obras de defesa transversais, como esporões ou quebramares, têm necessariamente a orientação Oeste-Este. A sua identificação recorre à leitura de quatro parâmetros, correspondentes à posição do perfil transversal em que a obra se localiza, à posição dos seus extremos no próprio perfil transversal (localização dos pontos mais a Oeste e a Este do esporão ou quebramar) e à cota de coroamento da estrutura. A cota de coroamento vai funcionar como cota mínima para todos os pontos situados no alinhamento da obra e a Este da mesma.

No caso de existirem defesas longitudinais aderentes, correspondentes a trechos lineares com orientação Sul-Norte, em que se considera que para Este dessa defesa será impossível haver erosão, será requerida respectivamente para cada trecho a informação relativa ao número dos perfis localizados nos extremos a Sul e a Norte do trecho, bem como à posição que a defesa ocupa. Para cada obra de defesa deve ser introduzida ainda a cota de coroamento. Considera-se que para Este as cotas do terreno são necessariamente iguais ou superiores à cota de coroamento da obra, o que constitui uma limitação em relação a algumas situações reais.

No futuro, pretende-se ainda possibilitar a criação de mais hipóteses de interacção entre a área modelada e o exterior, tais como a alimentação do sistema com areias provenientes das dunas, mas trazidas pelos ventos (traduzida pela alimentação de uma taxa de sedimentos ao longo de um trecho linear), dragagens (eventual simulação por alimentações artificiais negativas ainda não foi estudada), etc.

Na segunda linha do ficheiro “bound.dat” é contabilizado o número de situações de interacção com o exterior, para cada tipo de condição:

NRIV - Número de fontes aluvionares pontuais;

NAN - Número de casos de alimentação artificial, limitado a um máximo de dez, podendo no entanto ocorrer alimentações em simultâneo, mas em diferentes locais, ou no mesmo local em diferentes períodos do cálculo;

NGBW- Número de obras de defesa transversais, como esporões ou quebramares (limitado a um máximo de vinte existências);

NLWD- Número de trechos lineares de obras de defesa longitudinal aderente (limitado a um máximo de dez trechos).

Após a segunda linha, deverá ainda ser introduzida a seguinte informação:

Se NRIV  $\neq$  0, NRIV vezes

PRIV      VRIV

Se NAN  $\neq$  0, NAN vezes

ANV      TM1      TM2      PSW1      PSW2      PNE1      PNE2

Se NGBW  $\neq$  0, NGBW vezes

NROW      HEFO1      HEFO2      GBZZ

Se NLWD  $\neq$  0, NLWD vezes

N1      N2      P      LWZZ

Todos os dados relativos à posição da fonte aluvionar e volume de sedimentos, ao volume da alimentação artificial, o tempo da operação e a área abrangida pela alimentação, a informação relativa a cada obra de defesa transversal e de defesa longitudinal aderente também são descritos de imediato no ficheiro “resul.res”, e armazenados para posterior tratamento.

#### CALC - Cálculo de grandezas necessárias no processo

É nesta subrotina que se determinam algumas grandezas necessárias no posterior processo de cálculo.

Assim, é calculada a densidade dos sedimentos, como a relação entre a massa volúmica dos sedimentos e da água do mar. Esta grandeza é utilizada de seguida para a determinação do diâmetro adimensional dos grãos dos sedimentos. Após a determinação das duas grandezas atrás definidas, é possível calcular a velocidade de queda dos sedimentos, seguindo a proposta de Soulsby. Como foi referido na secção 4.1.3, existem outras propostas que podem introduzir alguma diferença na determinação da velocidade de queda dos sedimentos.

O principal objectivo desta subrotina é chegar à definição do parâmetro de escala que é utilizado na determinação da configuração do perfil de equilíbrio. Como se referiu durante o estudo dos perfis transversais, este parâmetro pode seguir diferentes propostas, sendo aqui adoptada a definição de Dean, directamente dependente da velocidade de queda dos sedimentos.

O valor do parâmetro de escala pode ser utilizado na tentativa de equilibrar a forma dos perfis transversais ao longo do processo de transporte longitudinal. Para essa opção, na proximidade da profundidade de fecho faz-se impor que a tangente do perfil transversal nunca seja inferior à tangente do perfil de equilíbrio nesse ponto.

O resultado do cálculo destas grandezas também é apresentado no ficheiro de resultados “resul.res”.

De seguida, dá-se entrada no ciclo de cálculo que se repete tantas vezes quantas as desejadas e indicadas pela variável NCAL definida na subrotina DADOS.

#### WAVES - Definição da agitação marítima

Possibilita a leitura do ficheiro “wave.dat”, para caracterização do clima de agitação, de acordo com o definido pelo código TWAV. O código pode traduzir a pretensão de uma onda de características constantes ao longo do processo de cálculo ou então, ondas de características variáveis de acordo com um ano típico de agitação. Uma terceira hipótese possibilita um clima de agitação aleatório, gerado num intervalo de alturas de onda limitado pelos valores mínimo e máximo e com a proveniência das ondas também limitada ao quadrante escolhido.

Em todos os casos, estas características das ondas são consideradas ao largo e iguais em toda a extensão, pelo que no processo de cálculo se procede à sua transformação, durante a sua propagação até à costa.

No caso do código TWAV ser 0 ou 2, o período de onda considerado segue a expressão 3.1, admitindo a linearidade entre alturas de onda e período. No caso do mesmo código ser igual a 1, o período considerado oscila aleatoriamente entre mais 2 s e menos 2 s que o valor obtido pela expressão 3.1.

Os dados a introduzir são:

Se TWAV = 0:

HS

RUMO

HS - altura de onda significativa, definida em metros;

RUMO- rumo de proveniência da onda, expresso em graus, contabilizados no sentido anti-horário, desde Norte.

Se TWAV = 1:

APER

WPER

APER - 10 valores com a indicação das probabilidades acumuladas de ocorrência de ondas até à altura significativa de cada classe. As classes estão definidas com um metro de altura, com exceção da primeira que corresponde a ondas até 0.5 m de altura significativa. Assim, a segunda classe de ondas corresponde a ondas com alturas entre 0.5 m e 1.5 m e assim sucessivamente, sendo que a última classe de ondas corresponde a ondas entre os 8.5 m e 9.5 m de altura. O décimo valor a introduzir corresponde ao total das probabilidades, ou seja, corresponde a 1;

WPER - 7 valores com a indicação das probabilidades acumuladas de ocorrência de ondas provenientes de quadrantes de rumos desde NNW até SSW, sendo que cada quadrante representa uma amplitude de 22.5°. O sétimo valor corresponde também ao total das probabilidades, ou seja, a 1.

Se TWAV = 2:

WH1

WH2

WD1	WD2
WH1	- altura mínima a que pode ser associada a altura significativa das ondas geradas aleatoriamente (expressa em metros);
WH2	- altura máxima a que pode ser associada a altura significativa das ondas geradas aleatoriamente (expressa em metros);
WD1	- limite a partir do qual pode ser gerada aleatoriamente a direcção de proveniência das ondas (expresso em graus, contabilizados no sentido anti-horário, desde Norte);
WD2	- limite até ao qual pode ser gerada aleatoriamente a direcção de proveniência das ondas (expresso em graus, contabilizados no sentido anti-horário, desde Norte).
O clima de agitação que resulta do cálculo é apresentado no ficheiro “actio.res”.	

#### TIDES - Definição do regime de marés

Permite a leitura de duas linhas de valores do ficheiro de texto “tide.dat”, de acordo com os códigos definidos para o tipo de dados de marés astronómicas (TAT) e marés meteorológicas (TMT) que se pretende.

O código referente às marés astronómicas permite optar entre um nível de água do mar fixo ao longo de todo o cálculo ou com este nível a variar segundo uma curva sinusoidal com extremos de 6 em 6 números de cálculo (se NH, definido na subrotina DADOS, for uma hora, este valor corresponde aproximadamente a uma maré do tipo semi-diurna). A variação do nível de maré depende ainda das marés vivas e marés mortas, existindo extremos de 168 em 168 números de cálculo (corresponde a 7 dias se o NH for igual a uma hora). A variação entre os extremos de marés vivas e marés mortas é admitida linear. Nesta segunda hipótese são introduzidos ainda mais dois valores no ficheiro de dados, descritos mais à frente. Note-se que os ciclos de maré diários e de marés vivas ou mortas se iniciam aleatoriamente cada vez que se recorre ao programa de cálculo. Assim, cada ciclo é independente e o processo de cálculo não se inicia sempre no mesmo ponto de maré, mesmo que as condições do problema sejam exactamente as mesmas.

O código referente às marés meteorológicas permite optar entre um nível fixo da água do mar por efeito das pressões meteorológicas, variar aleatoriamente entre dois valores extremos, definidos

pelo utilizador, ou a variação do nível de maré meteorológica em função da altura de onda em cada instante, permitindo o uso de 4 escalões de valores de amplitudes de maré. Os escalões de alturas de onda são definidos pelo utilizador, bem como as máximas sobrelevações e subelevações de cada escalão. Nesta situação, a maré meteorológica pode variar aleatoriamente entre os extremos definidos em cada caso de altura de onda.

Os dados a introduzir são os seguintes:

1ª linha do ficheiro de texto, correspondente às marés astronómicas:

Se TAT = 0

MSWL

Se TAT = 1

MSWL      HRAN      LRAN

2ª linha do ficheiro de texto, correspondente às marés meteorológicas:

Se TMT = 0

MWL

Se TMT = 1

HMET      LMET

Se TMT = 2

HS1      HS2      HS3      MET1      MET2      MET3      MET4      MET5      MET6

MSWL- nível médio das águas do mar, definido em metros acima do zero hidrográfico.

No caso do código ser 0, este valor é mantido como o nível do mar em todo o processo iterativo, mas no caso do código ser 1, o nível do mar oscila em torno deste nível médio;

HRAN - amplitude máxima da maré, obtida para marés vivas e definida em metros;

LRAN - amplitude máxima da maré, obtida para marés mortas e definida em metros;

MWL - desnível da água do mar por efeito das altas ou baixas pressões meteorológicas



(expresso em metros e positivo quando acima do nível médio das águas do mar);

HMET - valor positivo correspondente à sobreelevação máxima do nível das águas do mar por efeito de baixas pressões, ou valor negativo correspondente à subelevação mínima do nível das águas do mar por efeito de altas pressões (expresso em metros);

LMET - em correspondência com a variável anterior, subelevação máxima do nível das águas do mar por efeito das altas pressões, ou sobreelevação mínima por efeito das baixas pressões (expresso em metros);

HS1, HS2, HS3, MET1, MET2, MET3, MET4, MET5, MET6 - de acordo com o gráfico da figura.

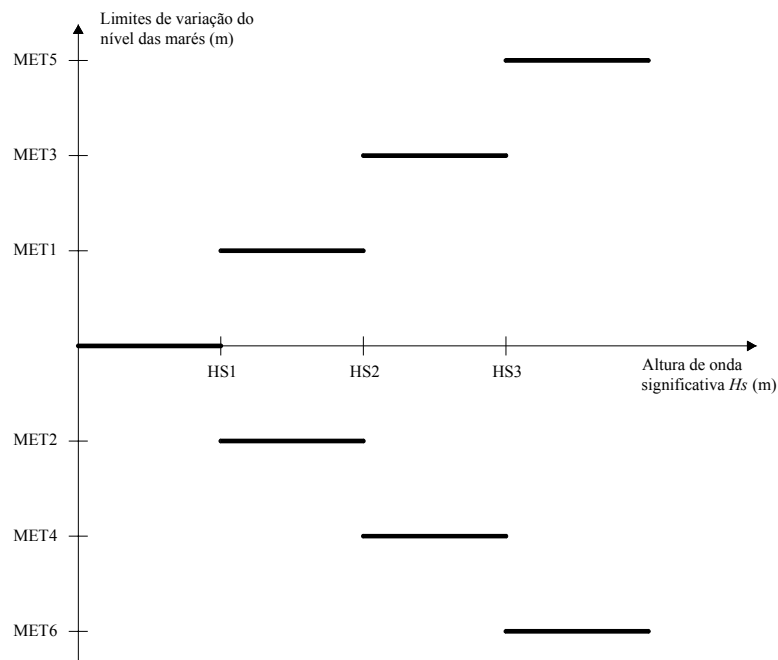


Figura 5.13: Indicação dos limites a introduzir na definição de uma maré do tipo TMT = 2.

A informação relativa à introdução destes dados é apresentada no ficheiro de saída “actio.res”.

O efeito de cada tipo de maré pode ser considerado separadamente ou em simultâneo. Deste modo, pode ser admitida apenas o efeito das marés astronómicas, das marés meteorológicas, de ambas ou de nenhuma delas.

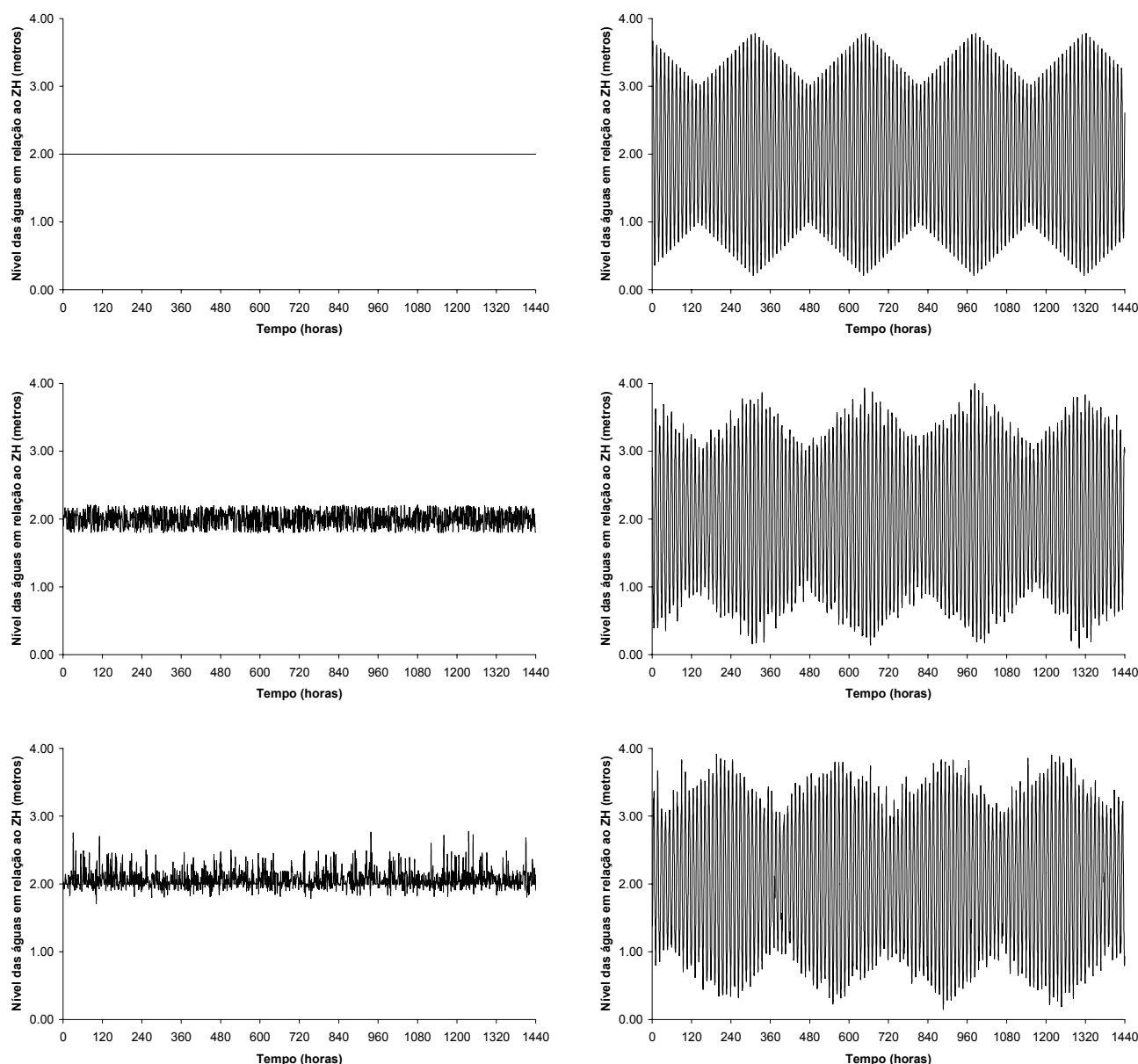


Figura 5.14: Resultado do nível médio da água do mar para a associação das diferentes hipóteses de conjugação de marés astronómicas e meteorológicas.

A título de exemplo, apresenta-se a oscilação do nível do mar em 6 situações distintas, ao longo de 1440 h (2 meses). No caso das marés astronómicas, optou-se por um nível médio das águas do mar de 2.0 m e amplitudes máximas de marés vivas de 3.6 m e de marés mortas de 2.0 m, enquanto que para as marés meteorológicas, optou-se por um valor fixo de 0.0 m acima do nível médio, por uma oscilação aleatória entre subelevações de -0.2 m e sobrelevações de +0.2 m, ou ainda por uma relação com as alturas de onda, de forma a ondas inferiores a 1 m de altura não terem variação do nível da água, entre 1 m e 3 m de altura terem valores máximos de sobrelevações de +0.2 m e subelevações de -0.1 m, entre 3 m e 6 m de altura terem valores máximos de sobrelevações de

+0.5 m e subelevações de -0.2 m e para ondas superiores a 6 m de altura, valores máximos de sobrelevações de +0.8 m e subelevações de -0.3 m. Apesar de não ser perceptível na figura, a variação do nível de água em cada ciclo de maré astronómica é do tipo sinusoidal.

Para o exemplo apresentado, registaram-se os valores extremos do nível das águas apresentado na tabela.

Tabela 5.1: Valores extremos do nível médio da água do mar, obtidos no modelo, em diferentes situações de maré.

TAT	TMT	Máximo nível de água (m)	Mínimo nível de água (m)
0	0	2.00	2.00
1	0	3.78	0.21
0	1	2.20	1.80
1	1	3.99	0.10
0	2	2.77	1.71
1	2	3.90	0.15

No final, esta subrotina ainda permite associar ao efeito dos dois tipos de maré, a taxa de elevação do nível do mar, pelo que o resultado final desta subrotina é o nível do mar em cada instante, por efeito de marés astronómicas, marés meteorológicas e subida generalizada do nível médio da água do mar. A elevação do nível do mar é expressa pela variável SLR, definida na subrotina DADOS, e deve indicar um cenário de subida do nível do mar, representado em m/ano.

Note-se que a componente de sedimentos transportados por efeitos das correntes originadas pelas marés não é considerada, o que será aceitável no caso em que estas correntes tenham velocidades relativamente pequenas face aos valores dos campos de velocidades associados à agitação.

#### CROSS - Avaliação dos perfis transversais

Nesta subrotina definem-se os pontos particulares dos diversos perfis transversais. Para o controlo das posições limites activas (zona mais profunda e limite do espraçamento das ondas) inicia-se o registo de onde ocorrem alterações das cotas do terreno de cada perfil transversal.

De seguida, por recurso a uma função, é definida a profundidade de fecho em cada instante, dependendo da altura significativa da onda e do respectivo período de onda, de acordo com as expressões de Hallermeier ou Birkemeier, conforme a escolha estabelecida no código TCD, lido na subrotina DADOS. Depois de calculado o valor da profundidade de fecho, é avaliado qual o primeiro ponto de cada perfil transversal da grelha modelada, em que a profundidade é superior à profundidade de fecho. Caso a profundidade de fecho se situe fora da grelha modelada, o cálculo é interrompido e é transmitida uma informação do sucedido para o ficheiro “resul.res”.

Em sequência, é definida a profundidade de rebentação das ondas, admitida como sendo o quociente entre a altura da onda significativa e o coeficiente de 0.78, de acordo com a expressão 3.6. Note-se que esta é uma abordagem simplista, pois existem alternativas mais complexas, mas em face das incertezas envolvidas, esta simplificação não é significativa. Com base na profundidade de rebentação, é avaliado qual o primeiro ponto de cada perfil transversal da grelha modelada, em que a profundidade é superior à profundidade de rebentação.

Depois, para cada perfil transversal e em cada instante do processo iterativo é avaliada a posição do primeiro ponto da grelha acima do nível das águas do mar. É com base nos pontos anterior e posterior ao primeiro ponto emerso que se define a inclinação da praia em cada perfil.

Como já foi referido, a definição de espraimento é um importante parâmetro na determinação da parte activa de um perfil de praia, mas é difícil de quantificar. No modelo, o espraimento da onda em cada perfil é definido em função das características das ondas (altura significativa e período) e da inclinação da praia, de acordo com a expressão 3.10, apresentada anteriormente. Após a estimativa da altura de espraimento, é definido o primeiro ponto do perfil acima da cota de espraimento. Se esse ponto se situar fora da grelha modelada, o cálculo é interrompido e é transmitida uma informação do sucedido para o ficheiro “resul.res”.

O tratamento do espraimento é dependente do tipo de praia ou da existência de estruturas de defesa. Por simplificação, o programa não distingue estas duas situações, até porque o transporte sedimentar na frente de obras de defesa está normalmente limitado pelo volume de sedimentos disponível.

Este processo permite limitar a parte activa de cada perfil, em cada instante, ou seja, em função da topografia e características de agitação. Só a zona do perfil assim definida é que fica sujeita a variações de cotas durante cada iteração. Para posterior representação gráfica (no ficheiro

“plant.dxf”), nesta subrotina vai sendo mantido o controlo dos pontos de grelha que correspondem aos limites transversais em que há variação de cotas, permitindo no final do processo de cálculo a representação dos limites da faixa de cotas alteradas, na subrotina DESIGN.

Em resumo, para cada instante do cálculo, esta subrotina determina a posição dos pontos da grelha modelada onde irá ocorrer alteração de cotas por efeito do transporte longitudinal de sedimentos numa faixa que corresponde à largura do perfil activo. Este pressuposto pode ser contestado, pois por definição a profundidade de fecho corresponde à profundidade a partir da qual não ocorre alteração significativa das cotas do perfil transversal com base na altura significativa de onda excedida 12 h/ano, sendo que neste cálculo essa análise varia em cada instante de tempo.

Além das instruções referidas, no final da primeira iteração do cálculo, a informação correspondente à posição inicial da linha de costa referida ao nível médio das águas do mar é enviada para o ficheiro “plant.dxf”.

#### WTRAN - Propagação das ondas para a costa

Nesta subrotina procede-se à transformação das características da onda na sua propagação desde o largo até à costa. Os fenómenos avaliados são a refacção, o empolamento e a difracção (o espraçamento da onda na sua rebentação ficou quantificado na subrotina anterior). Como este processo se repete em todos os instantes de cálculo e ao longo de toda a extensão da costa, corresponde a um número elevado de operações. Assim, o algoritmo que o representa deve ser eficiente e simples.

Deste modo inicia-se a subrotina com o cálculo do comprimento de onda ao largo, definido de acordo com a expressão 4.29. O comprimento de onda local depende da profundidade de rebentação da onda e é calculado com o recurso a um processo iterativo, pois a equação que permite a sua determinação é uma equação implícita. No algoritmo, o erro máximo assumido como aceitável na determinação do comprimento de onda local é de 1 cm.

$$L_b = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi d_b}{L_b}\right) \quad (5.18)$$

De seguida é definida qual a orientação da linha batimétrica onde se admite ocorrer a rebentação em cada instante. Este processo implica a estimativa do local onde ocorre a rebentação, por

determinação da distância referida ao eixo dos YY do referencial apresentado na figura 5.12. A consideração de um mesmo ângulo para trechos extensos da costa impediria a aplicação da teoria desenvolvida neste modelo. O facto de haver morfologia variada vai ser atenuado pela tendência das ondas de suavizar as formas e uniformizar os ângulos. Assim, a estimativa dos ângulos é efectuada por interpolação linear de cotas dos pontos da grelha localizados na posição de rebentação da onda obtida na subrotina CROSS.

Conhecida a posição da linha de rebentação ao longo da grelha modelada, é possível avaliar qual a sua orientação entre pontos da grelha. Cada ângulo é definido com base na localização da linha de rebentação nos perfis transversais consecutivos em análise (para a célula  $i$  são utilizados os perfis  $i$  e  $i+1$ ). O ângulo é considerado positivo no sentido horário, sendo contabilizado desde Norte. Por questões de cálculo numérico, limita-se a relação entre a orientação da onda e a batimetria de rebentação a  $\pm 42^\circ$ .

Para não introduzir mais variáveis e fenómenos de elevada complexidade ao modelo e de forma a não pesar o processo de cálculo, aplica-se uma teoria simples de refração da onda. Como foi visto, se a linha de crista de uma onda forma um determinado ângulo com as curvas de nível do fundo do mar (batimétricas), a onda deverá sofrer uma deformação, tentando alinhar-se com as curvas de nível do fundo. Neste caso, para a definição da propagação da onda, admite-se que a variação da topografia é gradual e que é válida a teoria linear das ondas sinusoidais (Airy), sendo constante o período de onda. Com estes pressupostos considera-se válida a lei de Snell.

Com o conhecimento da orientação da onda ao largo (RUMO) e determinada a orientação da linha de costa na rebentação (BANG) é possível aplicar a lei de Snell, e calcular o ângulo entre a linha de rebentação e a direcção da onda na rebentação (TETB). Os ângulos  $\alpha_b$  e  $\alpha_0$  da expressão correspondem respectivamente às variáveis TETB e (RUMO+BANG).

$$\frac{\sin \alpha_b}{L_b} = \frac{\sin \alpha_0}{L_0} \quad (5.19)$$

As características das ondas na rebentação obrigam ao conhecimento de três grandezas (altura de onda, profundidade e ângulo da crista da onda). Assim, após a determinação do ângulo, por aplicação de uma equação de refração das ondas (lei de Snell), e conhecida a profundidade de rebentação, por aplicação do critério de rebentação já referido, determina-se a altura de onda na rebentação através do conhecimento e aplicação de dois coeficientes à altura de onda ao largo.

Deste modo, na sequência de cálculo, o coeficiente de empolamento da onda na rebentação ( $K_S$ ) e o coeficiente de refração ( $K_R$ ) são determinados de seguida.

$$K_S = \frac{\cosh \frac{2\pi d_b}{L_b}}{\sqrt{\cosh \frac{2\pi d_b}{L_b} \sinh \frac{2\pi d_b}{L_b} + \frac{2\pi d_b}{L_b}}} \quad (5.20)$$

$$K_R = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_b}} \quad (5.21)$$

Note-se que o coeficiente de empolamento é idêntico para todas as secções, em cada instante do cálculo, enquanto o coeficiente de refração, dependendo directamente do ângulo da onda na rebentação, vai por isso variar ao longo dos pontos da costa.

A refração calculada deste modo é independente da batimetria existente no percurso da onda, mas representa uma aproximação simples ao fenómeno. No entanto, os resultados obtidos estão em completo acordo com o exemplo apresentado por Vincent *et al.* (2002), onde também é exposta esta teoria.

Tabela 5.2: Resultados da transformação da onda na sua propagação até à rebentação, por aplicação do modelo LTC.

$h$ (m)	$L_b$ (m)	$K_S$	$\alpha_0 = 90^\circ$			$\alpha_0 = 75^\circ$			$\alpha_0 = 45^\circ$		
			$K_R$	$H_b$ (m)	$\alpha_b$ (°)	$K_R$	$H_b$ (m)	$\alpha_b$ (°)	$K_R$	$H_b$ (m)	$\alpha_b$ (°)
20	198	1.001	1.000	1.00	90.0	0.988	0.99	81.6	0.878	0.88	66.6
15	174	1.052	1.000	1.05	90.0	0.987	1.04	82.6	0.869	0.91	69.5
10	144	1.138	1.000	1.14	90.0	0.986	1.12	83.9	0.860	0.98	73.1
8	130	1.192	1.000	1.19	90.0	0.985	1.17	84.5	0.856	1.02	74.9
6	113	1.269	1.000	1.27	90.0	0.985	1.25	85.2	0.852	1.08	76.9
4	93	1.392	1.000	1.39	90.0	0.984	1.37	86.1	0.848	1.18	79.2
2	66	1.641	1.000	1.64	90.0	0.983	1.61	87.2	0.845	1.39	82.4

Na tabela 5.2 apresentam-se os resultados de um exemplo de aplicação do programa, para os coeficientes de refração e empolamento, altura de onda na rebentação e respectiva direcção da onda na rebentação. No exemplo, aplicou-se uma onda ao largo, representada por uma altura significativa de um metro, proveniente de três direcções diferentes. A batimetria utilizada é regular e correspondente ao perfil de equilíbrio de Dean, para  $m = 2/3$  e com o diâmetro médio das areias igual a 0.3 mm.

A figura seguinte corresponde aos resultados obtidos com recurso ao modelo SWAN (Simulation Waves Nearshore), desenvolvido pela Delft University of Technology, da Holanda. Neste modelo foi estudado o mesmo exemplo, onde foi necessário considerar ainda a propagação de um espectro de ondas do tipo Jonswap e a velocidade do vento, adoptada com 0.1 m/s, no sentido da propagação das ondas. A altura de onda significativa vai-se alterando com a propagação da onda, bem como o rumo indicado pelas setas marcadas no desenho.

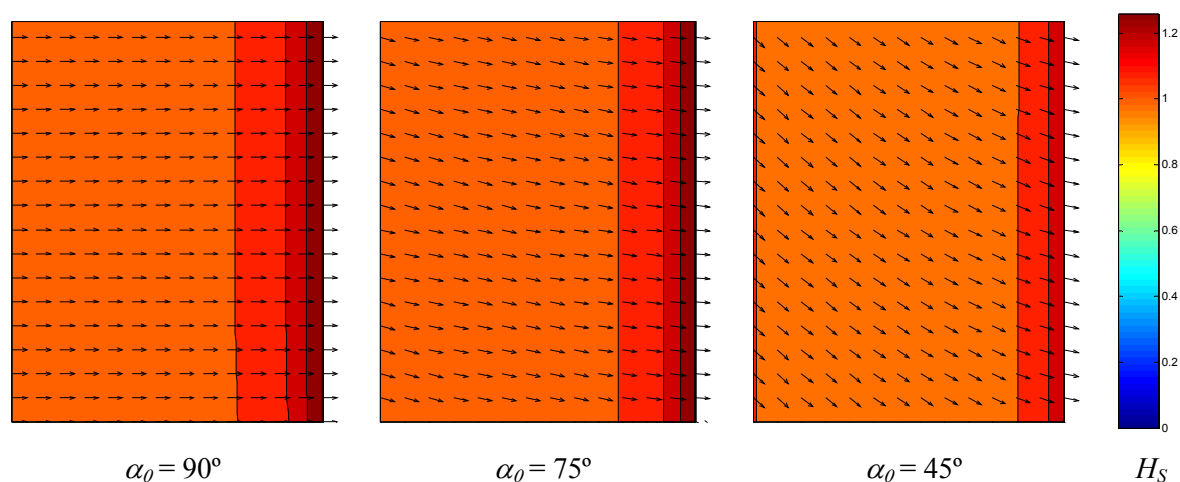


Figura 5.15: Propagação das ondas para rumos ao largo de  $90^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $45^\circ$  com o Norte.

Os resultados numéricos do SWAN são apresentados na tabela 5.3. Estes resultados representam diferenças com os anteriores na ordem dos 20% a 30%, sendo que este exemplo é para batimetrias simples e que respeitam uma variação gradual. Batimetrias mais complexas representariam diferenças superiores.



Tabela 5.3: Resultados do modelo de propagação de ondas SWAN.

$h$ (m)	$\alpha_0 = 90^\circ$		$\alpha_0 = 75^\circ$		$\alpha_0 = 45^\circ$	
	$H_S$ (m)	$\alpha$ (°)	$H_S$ (m)	$\alpha$ (°)	$H_S$ (m)	$\alpha$ (°)
20	1.03	90.0	1.02	78.3	0.94	57.2
15	1.06	90.0	1.05	80.0	0.94	62.2
10	1.13	90.0	1.11	81.9	0.98	67.6
8	1.17	90.0	1.16	82.8	1.01	70.0
6	1.24	90.0	1.22	83.7	1.06	72.7
4	1.33	90.0	1.31	84.8	1.13	75.6

O fenómeno da difracção acontece quando a onda, na sua propagação para a costa, encontra um obstáculo, sofrendo alterações de direcção e altura. Este fenómeno é normalmente traduzido por diferentes ábacos em função do ângulo de incidência da onda com o obstáculo. O seu cálculo numérico é complexo. Nesta fase de desenvolvimento do modelo, para tentar reproduzir este fenómeno foi admitida uma simplificação, baseada nos resultados do ábaco apresentado em Sorensen *et al.* (2003), para a situação de ondas a descrever  $60^\circ$  com o obstáculo.

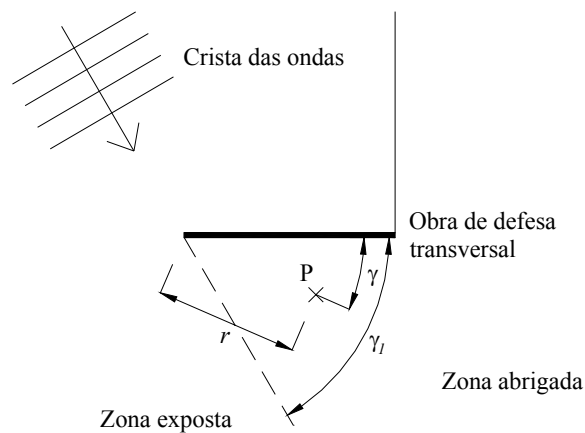


Figura 5.16: Variáveis utilizadas na caracterização da difracção, num ponto P, localizado na zona abrigada de uma obra de defesa transversal (esporão ou quebramar).

Assim, foi adoptado um coeficiente de difracção redutor da altura de onda, em função das coordenadas polares do ponto em análise, com a origem do referencial no ponto de difracção.  $r$  representa a distância ao ponto de difracção e  $\gamma$  o ângulo formado entre a linha que une o ponto de difracção e o ponto em análise, com a orientação da obra de defesa (figura 5.16).  $L_i$  é o

comprimento de onda, registado quando a onda encontra o obstáculo. Após alguma análise foi adoptado o coeficiente  $K_d$ , de acordo com as expressões seguintes:

$$C_1 = \left(1 - \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma_1}\right)^2 \quad (5.22)$$

$$C_2 = 1 - C_1 \quad (5.23)$$

$$K_d = C_1 + \left( \frac{e^{-2\frac{r}{L_i}} - 0.01\frac{r}{L_i} + 0.2}{1.2} \right) C_2 \quad (5.24)$$

O modelo de cálculo só procede à aplicação do coeficiente de difracção no caso da existência de esporões ou obras longitudinais aderentes. Em ambos os casos, para cada iteração de cálculo, ou seja, para cada proveniência de onda, é primeiro avaliado o lado de sotamar da obra e só depois se quantifica o coeficiente de difracção. Por questões numéricas, este coeficiente não toma valores inferiores a 0.1.

Na tabela 5.4 apresentam-se os valores que resultam da aplicação das expressões expostas, para diferentes situações. Como se pode verificar, no limiar da zona de sombra da obra de defesa ( $\gamma/\gamma_1 = 1$ ) é admitido que não há alteração da altura da onda, mas para o interior da zona de sombra o efeito da difracção vai sendo mais significativo. Da mesma forma, o efeito da difracção no próprio ponto de difracção ( $r/L_i = 0$ ) é nulo, mas esse efeito vai aumentando com a distância, à medida que a onda se vai propagando.

Tabela 5.4: Coeficientes de difracção obtidos por aplicação do modelo LTC.

$\gamma/\gamma_1$	$r/L_i$						
	0	0.5	1	2	5	10	20
0.0	1.00	0.47	0.27	0.17	0.13	0.10	0.10
0.1	1.00	0.47	0.28	0.17	0.13	0.10	0.10
0.2	1.00	0.49	0.30	0.20	0.16	0.12	0.10
0.3	1.00	0.52	0.34	0.24	0.20	0.17	0.10
0.4	1.00	0.55	0.39	0.30	0.27	0.23	0.16
0.5	1.00	0.60	0.45	0.37	0.34	0.31	0.25
0.6	1.00	0.66	0.53	0.47	0.44	0.41	0.36
0.7	1.00	0.73	0.63	0.57	0.55	0.53	0.49
0.8	1.00	0.81	0.74	0.70	0.69	0.67	0.64
0.9	1.00	0.90	0.86	0.84	0.83	0.83	0.81
1.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

PVSED - Volume potencial de transporte sólido

Para cada perfil é quantificada a altura da onda na rebentação, por aplicação dos coeficientes de transformação da onda determinados anteriormente. De seguida, em função da escolha do utilizador, é calculado o volume potencial de transporte de sedimentos por aplicação da fórmula CERC ou da fórmula de Kamphuis.

A opção pela fórmula CERC é essencialmente dependente da altura de onda na rebentação e da orientação da onda na rebentação. Ao contrário da opção anterior, a opção pela fórmula de Kamphuis introduz a dependência directa da inclinação da praia, do diâmetro médio das areias e do período de onda, aumentando significativamente as possibilidades de conjugação de diferentes parâmetros. Os resultados de volumes de sedimentos em transporte são positivos se o transporte ocorrer de Norte para Sul.

Também dependente da definição introduzida nos dados, é feita a quantificação dos volumes nas fronteiras Norte e Sul do modelo.

### RVSED - Volume efectivo de transporte sólido

Nesta subrotina, começa-se por estimar as distâncias a que ocorrem os limites dos perfis activos, permitindo a estimativa da largura activa de cada perfil transversal. Estas distâncias são referidas ao eixo dos YY do referencial apresentado na figura 5.12 e a estimativa é também efectuada por interpolação linear de cotas dos pontos da grelha localizados nas posições obtidas na subrotina CROSS.

Em seguida é avaliado o volume de sedimentos disponível para transporte em cada perfil. Por vezes surgem limitações de volumes porque são definidas inclinações mínimas que o perfil tem que respeitar. Ao admitir que as cotas não podem baixar indefinidamente, pois a evolução do perfil tem que respeitar uma inclinação mínima (eventualmente nula) imposta pelo utilizador através da variável INCI, poderá dar-se o caso da inclinação da praia imersa se manter constante e igual ao mínimo admitido até ao nível da água, impossibilitando mais erosão por inexistência de sedimentos para transporte. Esse efeito tem repercussões para sotamar das secções onde ocorrem.

A questão da transposição de sedimentos em torno de um esporão não é perfeitamente compreendida. Os esporões são por vezes considerados permeáveis ao atravessamento dos sedimentos, quer na zona do enraizamento, quer por porosidade. No entanto, a metodologia utilizada no modelo vai ao encontro do esquematizado na figura 3.24, onde se considera que o esporão é impermeável e existe apenas passagem de sedimentos em torno da cabeça do esporão.

Na análise do efeito dos esporões ou quebramares também é inicialmente avaliado qual o volume de sedimentos disponível na parte activa do perfil correspondente à obra de defesa. Poderá dar-se o caso do volume realmente passível de ser transportado na frente da obra de defesa ser nulo, ou pelo menos menor que o transporte potencial. Após essa avaliação, verifica-se qual é a percentagem do perfil activo a barlar do esporão que está a uma profundidade superior à da cabeça do esporão. Admite-se que a transposição de sedimentos para sotamar da obra será proporcional a essa percentagem e ao volume de sedimentos provenientes de barlar. Desta forma, nem todo o volume de sedimentos que atinge a obra de defesa consegue transpor (por vezes o volume que transpõe a obra é nulo), acumulando-se sedimentos na zona a barlar do esporão. A sotamar, o volume real de sedimentos passa a ser inferior ao potencial e, devido ao défice de sedimentos, passa a existir erosão.

Durante o decorrer do cálculo é previsível começar a haver transposição de areias na frente do esporão, sendo esses sedimentos distribuídos no perfil a sotamar. Mesmo que a largura do perfil activo de barlar seja além da cabeça do esporão, admite-se uma distribuição transversal de sedimentos que colocará a areia uniformemente no perfil activo de sotamar. Em função das características do problema serão atingidas posições de equilíbrio, com consequente estabilização da linha de costa.

Da mesma forma que nos esporões ou quebra-mares, nas obras de defesa aderente é inicialmente quantificado o volume real de sedimentos disponível na frente de cada perfil da obra aderente. De seguida são quantificados os volumes reais que podem atingir a posição a barlar da obra de defesa. Caso as obras estejam a condicionar a linha de costa, é quantificada uma percentagem do perfil activo de barlar que está a profundidades superiores às da obra de defesa, seguindo o mesmo critério dos esporões. Assim, o transporte de sedimentos ao longo da obra aderente está dependente das condições de barlar.

A ideia base de funcionamento consiste em considerar que à medida que a praia entra em erosão em frente da defesa, se dá uma diminuição progressiva da capacidade de transporte até ao seu anulamento, o qual corresponderá à reflexão total da energia da onda pela obra (Vicente e Clímaco, 2003).

#### BATHY - Actualização da altimetria

No início desta subrotina procede-se à inicialização das variáveis que quantificam os volumes em transporte para cada secção.

De seguida, é adicionado o volume de sedimentos correspondentes a alimentações artificiais, caso existam. Neste caso e de imediato, procede-se a verificações da inclinação dos taludes criados com o acréscimo de areias. Assim, se o elevar de cotas em determinadas zonas do perfil provocar inclinações da praia inferiores ao mínimo estabelecido pelo utilizador com a variável INCS, é efectuada uma redistribuição de cotas para as zonas interiores de forma a eliminar esse efeito. No caso da inclinação do talude criado exceder a estabilidade máxima admissível pelo atrito dos sedimentos (função da variável FI, introduzida pelo utilizador) a redistribuição de cotas corresponde a um deslizamento das areias para cotas mais profundas.

Para cada perfil é depois contabilizado qual o volume real em transporte em cada iteração do cálculo. Essa quantificação é efectuada para volumes provenientes de Norte ou de Sul, a entrar e a sair de cada secção. A quantificação dos volumes provenientes das fontes aluvionares é realizada separadamente. Esta forma de quantificação de volumes permite fazer o balanço sedimentar de cada secção e os sentidos de transporte.

Para cada secção e em cada instante é realizado um balanço de volumes, por comparação de volumes que entram e saem da secção. De imediato é avaliado se o perfil está em erosão ou acreção e quantificada a diferença de volumes. A eventual diferença de volumes é distribuída uniformemente pela área activa do perfil, definindo uma variação constante nas cotas altimétricas dos pontos da grelha correspondentes a esse perfil. Nos pontos de grelha extremos do perfil transversal activo, as cotas são também corrigidas, mas de forma proporcional à distância aos limites obtidos por interpolação para o perfil transversal activo.

Antes da alteração das cotas dos pontos dos perfis, procede-se ao cálculo dos valores limites das inclinações, de forma a proceder ao controlo da evolução das formas dos perfis transversais.

Para cada perfil é considerada que a máxima inclinação existente não pode ultrapassar a tangente do ângulo de atrito de repouso dos sedimentos (o valor de FI, introduzido na subrotina DADOS). Em termos de inclinações mínimas, diferenciam-se as situações do perfil emerso e imerso. A inclinação imersa é definida de acordo com o estabelecido pelo utilizador, podendo ser um valor constante ou a inclinação que corresponderia ao perfil de equilíbrio de Dean. Considera-se que esta é a mínima inclinação com que o perfil transversal activo pode ser representado em cada ponto. Em ambos os casos (inclinações mínimas e máximas), a correcção de cotas é efectuada por uma redistribuição do volume nos pontos adjacentes do perfil transversal, havendo assim a preocupação de se manter o balanço sedimentar.

Conhecida a variação de cotas é avaliada de forma distinta a situação de acreção (elevação das cotas do perfil) e de erosão (redução das cotas do perfil).

No caso de acreção, o primeiro passo é a verificação se a secção em análise é protegida por uma obra de defesa (aderente ou perpendicular à costa). Nessa situação não é permitida a acumulação de areias sobre a obra de defesa, sendo esse volume redistribuído uniformemente ao longo dos outros pontos situados em frente da obra, na parte activa do mesmo perfil. Esta imposição surge porque esse acumular de areias sobre a obra de defesa não poderia ser retirado em caso de erosão do perfil,

já que, por limitação do modelo, os pontos dos perfis correspondentes a obras de defesa não podem reduzir cotas. Desta forma, a cota de coroamento imposta nas obras de defesa são inalteráveis durante todo o cálculo.

O processo de elevação das cotas dos perfis em acreção decorre no sentido dos pontos menos profundos dos perfis para os mais profundos. Desta forma, após a elevação da cota num ponto, verifica-se de imediato se a inclinação mínima da praia (INCS) é respeitada. Caso seja necessário, por redistribuição de cotas, os pontos posteriores são alterados até que a condição de inclinação mínima se verifique. Na frente do talude criado pela acreção vai sendo verificada a estabilidade, pela inclinação máxima dependente do ângulo de atrito dos sedimentos (FI). Quando a estabilidade não se verifica, há deslizamento dos sedimentos para pontos mais profundos.

Nos perfis em erosão, o processo de alteração das cotas inicia-se dos pontos mais profundos para os de menor profundidade. Aqui, introduziu-se a possibilidade de ir baixando o perfil, de maneira a simular alguma perda de sedimentos para grandes profundidades. Assim, os pontos não podem baixar mais do que a inclinação mínima imposta, a menos que existam reduções das cotas para pontos a profundidades superiores à de fecho, definida pela variável DLP. No caso das limitações nas inclinações impossibilitarem o baixar das cotas nas maiores profundidades, é efectuada uma redistribuição com a cota do ponto no limite emerso do perfil activo a ser reduzida, caso não coincida com um ponto defendido por alguma obra.

Concluída a redução das cotas é efectuada uma verificação da estabilidade do talude em erosão. Se existir algum esporão ou alguma obra aderente no perfil em análise, então admite-se que não existe problema de estabilidade. No caso contrário, é efectuada uma distribuição de cotas, simulando a ruptura e deslizamento de sedimentos. Assim, o ponto abaixo do limite activo do perfil recebe uma elevação de cotas, enquanto o ponto extremo baixa, assegurando as inclinações máximas admissíveis, traduzidas pelo ângulo de atrito interno dos sedimentos.

No final da subrotina é enviado para o ficheiro “volum.res”, nas secções e instantes de cálculo desejadas e definidas também para as saídas gráficas, os resultados dos volumes em transporte. Quando concluído o processo de cálculo para o período de tempo estabelecido, nesse mesmo ficheiro são ainda indicadas as quantidades totais de sedimentos que entraram e saíram da grelha modelada, pelas fronteiras, por alimentação artificial e por fontes aluvionares pontuais.

## DESIGN - Saídas gráficas

O recurso a esta última subrotina é efectuado um número de vezes mais limitado, correspondente apenas ao número de saídas gráficas desejadas.

Nesta subrotina realizam-se as saídas gráficas ao longo do tempo, utilizando o ficheiro “plant.dxf” para representações em planta e o ficheiro “cross.dxf” para os perfis transversais desejados. O ficheiro “final.dxf” permite a modelação da situação final do terreno, para visualizações a 3D ou representações a cores.

Assim, para cada instante pretendido, é avaliada a configuração da linha de costa em relação ao nível médio das águas do mar, sendo em seguida representada no ficheiro “plant.dxf”. Os limites transversais da grelha onde existiram alterações de cotas dos pontos durante o cálculo são também representados em planta. Deste modo, define-se graficamente a área activa que resultou de todo o processo de cálculo.

A forma dos perfis transversais pretendidos e a sua evolução ao longo do tempo é apresentada no ficheiro “cross.dxf”. Na representação, a escala vertical é ampliada 10 vezes em relação à escala horizontal. A linha do nível médio das águas do mar é também representada nesta saída gráfica. No ficheiro “plant.dxf” é efectuada a indicação gráfica em planta, dos perfis transversais representados.

No final desta subrotina é enviada a indicação de coordenadas de todos os pontos da grelha com a respectiva cota final para o ficheiro “final.dxf”.

### **5.3.3. Testes de Comportamento e de Sensibilidade do Modelo**

Neste ponto do trabalho são apresentados diversos testes ao comportamento do modelo desenvolvido. Ao longo dos testes são realçados os pontos fortes do modelo, bem como indicadas as principais lacunas e dificuldades de modelação. São apresentadas aplicações simples para situações genéricas e avaliadas as diferenças de comportamento das diversas grandezas envolvidas. O comportamento do modelo é principalmente avaliado em função do volume de sedimentos em transporte e da posição da linha de costa. O comportamento das diferentes soluções de intervenção



de defesa costeira também é testado em situações genéricas. Os casos apresentados evoluem de situações fora de equilíbrio e em geral não chegam a atingir posições finais de equilíbrio.

Para avaliar os diferentes parâmetros e o comportamento do modelo em situações tipificadas e generalistas, foi criada uma região de  $8000 \times 20000 \text{ m}^2$ , com batimetria regular. Numa primeira fase, a batimetria foi gerada de acordo com o perfil de equilíbrio de Dean, para  $d_{50} = 0.3 \text{ mm}$ ,  $m = 2/3$  e  $A = 0.125$ . Acima da cota 0.0 m (ZH), o perfil seguiu uma inclinação constante de 3%. Nos testes de referência não se admitiram variações de maré e foi considerado o nível do mar à cota +2.0 m (ZH). As ondas foram admitidas constantes, com  $H_S = 2.0 \text{ m}$ ,  $T_{Hs} = 9.34 \text{ s}$  e proveniência de  $80^\circ$  com o Norte. Ainda na situação de referência, não se permitiram trocas de sedimentos (entradas e saídas) nas fronteiras Norte e Sul da área modelada e foi adoptada a fórmula CERC no cálculo da capacidade de transporte sedimentar e a fórmula de Hallermeier para estimar as profundidades de fecho dos perfis transversais. Foram admitidas inclinações nulas na evolução dos perfis em erosão e acreção e o ângulo de atrito dos sedimentos considerado foi de  $15^\circ$ . Não se permitiu o rebaixar de cotas além da profundidade de fecho. O tempo de cálculo foi de 10 anos, ou seja, 87600 h. A situação inicial corresponde a uma zona costeira longe do equilíbrio, pelo que se verificaram erosões e acreções significativas ao longo dos 10 anos de cálculo, realçando a influência dos diversos parâmetros.

Na situação de referência, a orientação da agitação conduz a transporte sedimentar no sentido Norte-Sul. Por imposição das condições nas fronteiras, não existem trocas sedimentares com o exterior da grelha modelada. Esta situação origina a acumulação de sedimentos junto à fronteira Sul do modelo, com consequente avanço da posição da linha de costa. Os sedimentos que acumulam a Sul têm única proveniência da área Norte da região modelada, onde se cria um défice sedimentar, conduzindo ao recuo da linha de costa. Desta forma, a orientação da linha de costa aproxima-se da orientação da crista da agitação. Verifica-se que não existe simetria entre as regiões em erosão e em acreção porque se assume que a forma dos perfis de erosão deixa de ser igual à dos perfis de acreção.

### *1. Avaliação da importância do espaçamento entre pontos da malha modelada*

Neste primeiro caso, foram testadas seis situações distintas de espaçamentos dos pontos da grelha modelada. Em termos gerais, as diferenças registadas entre os resultados não são significativas, sendo ligeiramente superiores no que se refere ao cálculo de volumes de sedimentos em transporte, do que no caso de avanço ou recuo da posição da linha de costa. O facto de aumentar o

espaçamento longitudinal dos pontos da grelha não traduz prejuízo no rigor de resultados, já que, por exemplo no caso das malhas de 20x50 m<sup>2</sup> e de 20x100 m<sup>2</sup>, não se registam diferenças superiores a 1%. No entanto, na segunda situação referida, o tempo de cálculo é reduzido para menos de metade. O tempo de cálculo foi obtido num computador com um processador de 930 MHz e 256 Mb de memória RAM. Os principais resultados são apresentados na tabela 5.5.

Na referida tabela, também se verifica que os volumes de sedimentos calculados reduzem com o aumento do espaçamento da grelha. Isto deve-se a uma maior rapidez de evolução para o equilíbrio porque é menor o número de pontos a calcular, correspondendo uma largura activa superior. Consequente há uma mais rápida redução da capacidade de transporte e menor volume de sedimentos em circulação. Estas diferenças ultrapassam ligeiramente os 20%, quando se comparam espaçamentos de grelha de 20 m e de 500 m. O sinal negativo indica recuo da posição da linha de costa em relação à situação inicial ou perda de volumes na secção.

Tabela 5.5: Resultados nas secções extremas do modelo (secção a Norte, com erosão máxima e secção a Sul, com acreção máxima), para diferentes espaçamentos entre pontos da malha modelada.

	Tempo de cálculo (s)	Volumes (m <sup>3</sup> /m)		Distâncias (m)	
		Extremo Sul	Extremo Norte	Extremo Sul	Extremo Norte
20x50 m <sup>2</sup>	1927	+8177	-9324	+1010	-837
20x100 m <sup>2</sup>	829	+8132	-9255	+1006	-834
50x100 m <sup>2</sup>	334	+7325	-8741	+1082	-887
100x100 m <sup>2</sup>	208	+7108	-7906	+1110	-938
200x200 m <sup>2</sup>	101	+6779	-7324	+1121	-945
500x500 m <sup>2</sup>	100	+6410	-6862	+1079	-952

Para a posição da linha de costa, o processo de cálculo da distância depende da interpolação linear entre pontos. Com o aumento do espaçamento entre pontos da grelha, o rigor da aproximação é menor e consequentemente não se consegue traduzir uma tendência de comportamento, registando-se aumento e diminuição nos resultados, independentemente de aumentar a distância entre pontos da grelha. Os resultados diferem entre si menos de 15%.

A representação gráfica das seis situações descritas é apresentada nas figuras seguintes. Na representação da configuração em planta da linha de costa, notam-se alguns vértices criados pelos

pontos da malha nas situações de maiores espaçamentos. O aspecto da evolução é contudo semelhante nos seis casos, traduzindo sempre a acumulação de sedimentos a Sul, com avanços da posição da linha de costa superiores a 1000 m e recuos da posição a Norte.

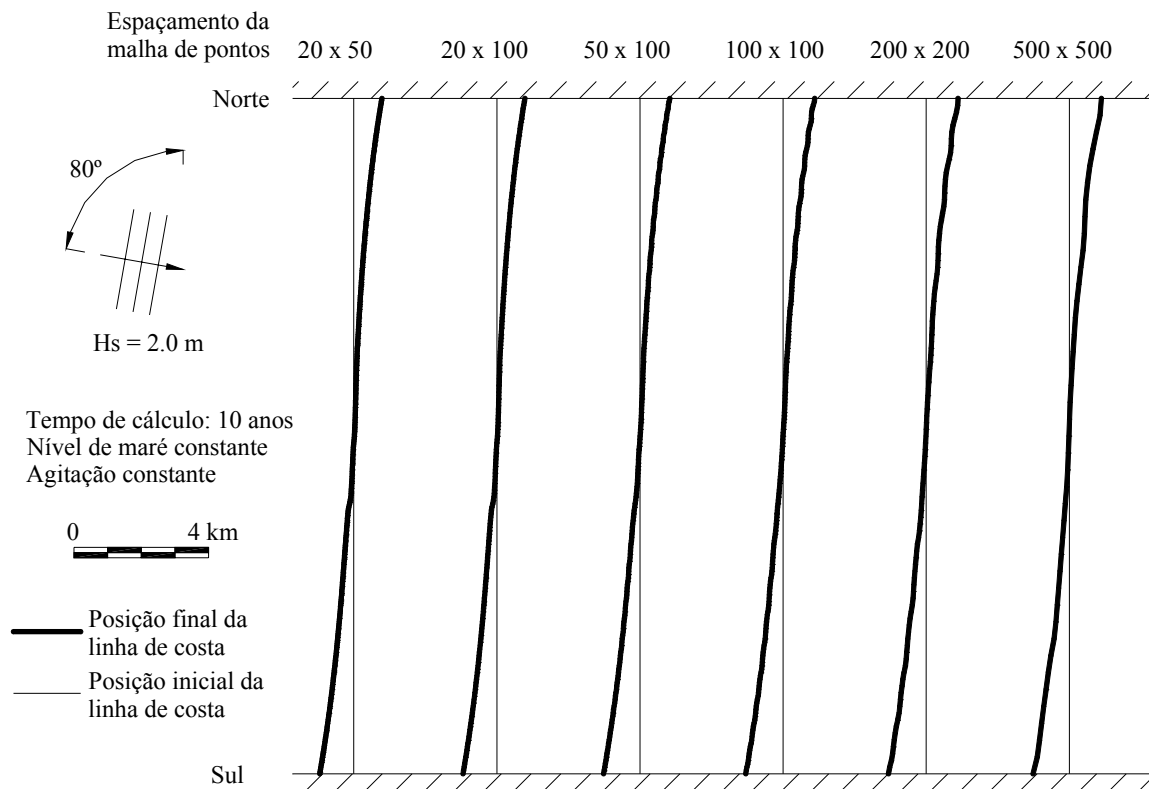


Figura 5.17: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes espaçamentos entre pontos da grelha modelada.

A análise dos perfis transversais permite desde logo a percepção da forma de evolução dos perfis em erosão ou acreção, quando se admite que a inclinação da evolução é nula. Assim, é criada uma plataforma horizontal emersa nos perfis em que se regista a acumulação de sedimentos e uma plataforma horizontal imersa nos perfis em que existe défice sedimentar.

O menor espaçamento entre pontos transversais da grelha modelada conduz a uma maior proximidade entre os pontos extremos do perfil activo. Esta situação aumenta a inclinação da face da praia, aproximando-se das inclinações admitidas pelo ângulo de atrito dos sedimentos. As situações em que o espaçamento entre pontos é maior, originam larguras activas superiores nos perfis transversais, com a alteração de cotas dos pontos situados em locais mais afastados.



apresentadas as configurações em planta dos resultados obtidos e as secções transversais dos perfis situados nos extremos Norte e Sul da área modelada.

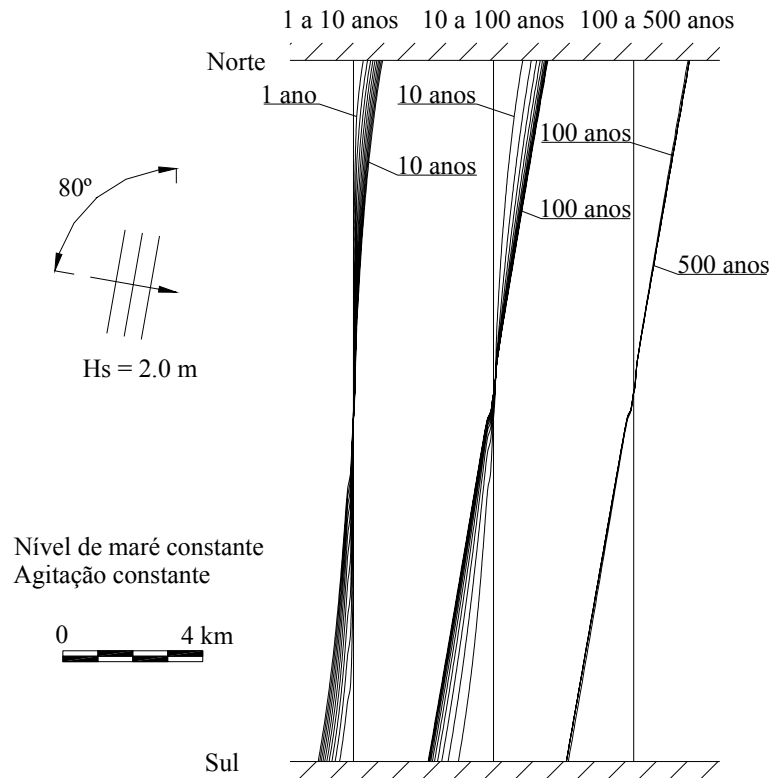


Figura 5.19: Configuração em planta da linha de costa ao longo do tempo, até ser atingida a posição de equilíbrio.

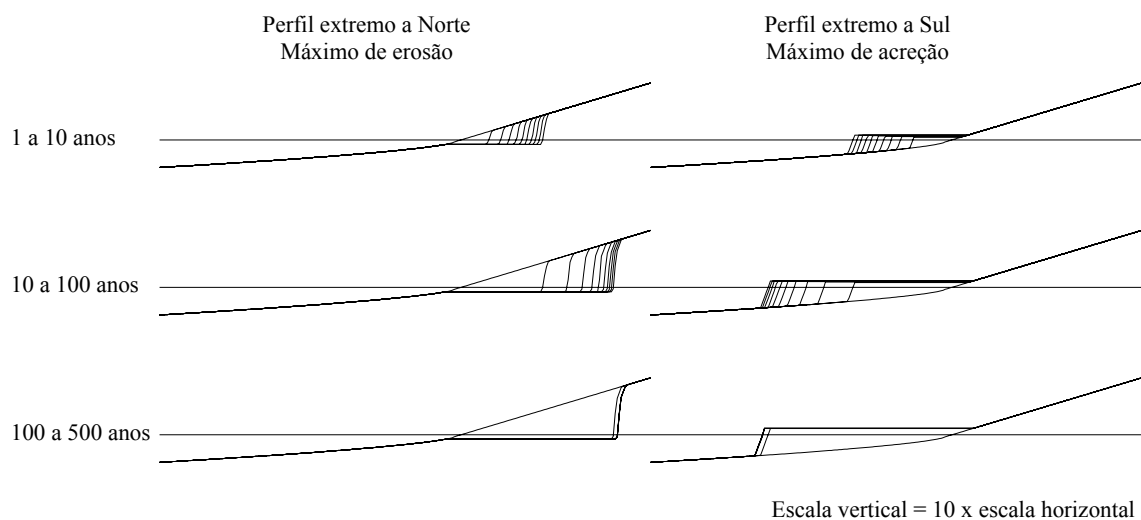


Figura 5.20: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, até ser atingida a configuração de equilíbrio.

Verificou-se que até aos 200 anos de simulação ainda existiam variações nas cotas dos pontos da grelha, no ajuste à acção da agitação, sendo que a partir desse período as diferenças são residuais. Considerando que os valores obtidos ao final dos 500 anos de simulação são os de equilíbrio, verifica-se que ao fim do primeiro ano ocorreram cerca de 20% das variações na posição da linha de costa, enquanto os volumes de sedimentos em transporte se alteraram em cerca de 10% da variação final. Ao final de dez anos, as alterações na posição da linha de costa já excederam 50% da variação final, enquanto os volumes de sedimentos diferem um pouco menos de 40% da variação final. Ao final de 70 anos de cálculo, verifica-se uma aproximação superior a 90% do resultado final, quer em termos de acreção, quer em termos de erosão de volumes de sedimentos ou de distâncias da posição da linha de costa. Ao fim de 100 anos os resultados já ultrapassam 95% dos resultados finais e como foi referido, ao fim de 200 anos as diferenças verificadas em comparação com os 500 anos são inferiores a 1% e consideradas residuais.

Constata-se uma evolução no sentido da convergência de resultados, com as variações obtidas a serem cada vez menos importantes ao longo do tempo, quer ao nível dos volumes, quer em termos de posição da linha de costa. O gráfico seguinte representa essa mesma evolução ao longo dos primeiros 200 anos de simulação, onde é visível a redução de importância no tempo, das variações de posição da linha de costa e volumes de sedimentos nas secções extremas da área modelada.

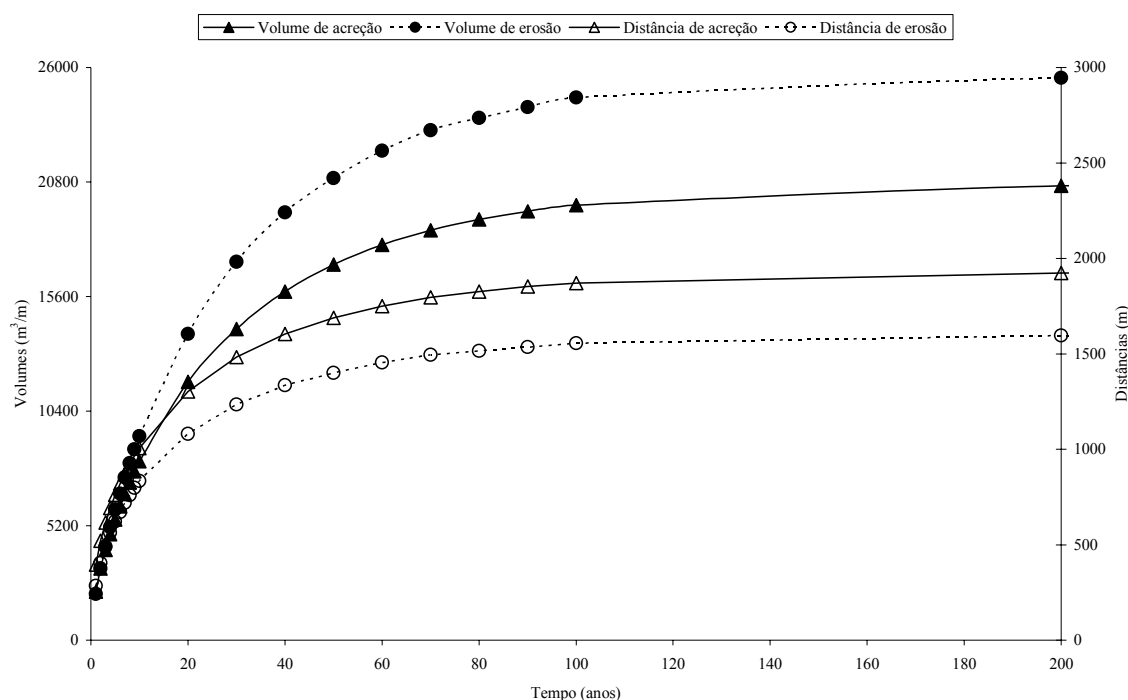


Figura 5.21: Evolução no tempo de volumes de sedimentos e distâncias da linha de costa à posição inicial, para as secções extremas da grelha de pontos modelada.

No final dos 500 anos de simulação, a linha que une os pontos extremos da linha de costa é perpendicular ao rumo da agitação incidente. A configuração da costa evidencia uma ligeira concavidade.

### *3. Avaliação da importância das condições fronteira*

Como facilmente se constata, a definição das condições fronteira da malha a modelar é fundamental nos resultados a obter. Assim, para a avaliação de casos reais é importante definir zonas a modelar em que se conheçam as condições de alimentação sedimentar nos extremos. Infelizmente, a prática demonstra que nem sempre é possível ter acesso a dados fiáveis.

Como são três as variantes de introdução de dados que o modelo permite explorar na definição de volumes de sedimentos nas fronteiras, são também três as opções testadas. O utilizador pode definir um caudal sedimentar fixo em cada fronteira, pode optar por uma taxa de erosão ou acreção constante ao longo de todo o cálculo ou ainda pode escolher uma aproximação às condições vizinhas da fronteira. Para cada uma das opções foram experimentadas diversas situações, cujos resultados estão expostos nas figuras 5.22 a 5.24. Pode ser considerada qualquer opção numa das fronteiras, independentemente da condição imposta na outra fronteira.

Para a opção de caudais sólidos constantes e conhecidos nas fronteiras, foram testados os casos de entradas a Norte ao longo de todo o processo de cálculo, com valores de 0 m<sup>3</sup>/hora, 150 m<sup>3</sup>/hora, 300 m<sup>3</sup>/hora e 450 m<sup>3</sup>/hora, com correspondentes saídas a Sul. Tendo-se avaliado que a capacidade de transporte da onda modelada nas condições iniciais em 367 m<sup>3</sup>/hora, a imposição deste caudal sólido a entrar na fronteira Norte e a sair na fronteira Sul conduziria a uma situação de equilíbrio dinâmico, mantendo inalterada a configuração da linha de costa ao longo do processo de cálculo.

No exemplo de entradas a Norte e saídas a Sul de 300 m<sup>3</sup>/hora de sedimentos, a linha de costa inicial e final estão bastante próximas. As condições sedimentares nas fronteiras aproximam-se da capacidade de transporte da agitação marítima. Na situação de 450 m<sup>3</sup>/hora de volumes de sedimentos nas fronteiras é excedida a capacidade inicial de transporte das ondas. Assim, resulta uma posição de linha de costa com orientação contrária aos exemplos apresentados até aqui. Este facto deve-se à evolução natural da linha de costa, na tentativa de aproximar a capacidade de transporte das ondas aos volumes sedimentares em circulação.

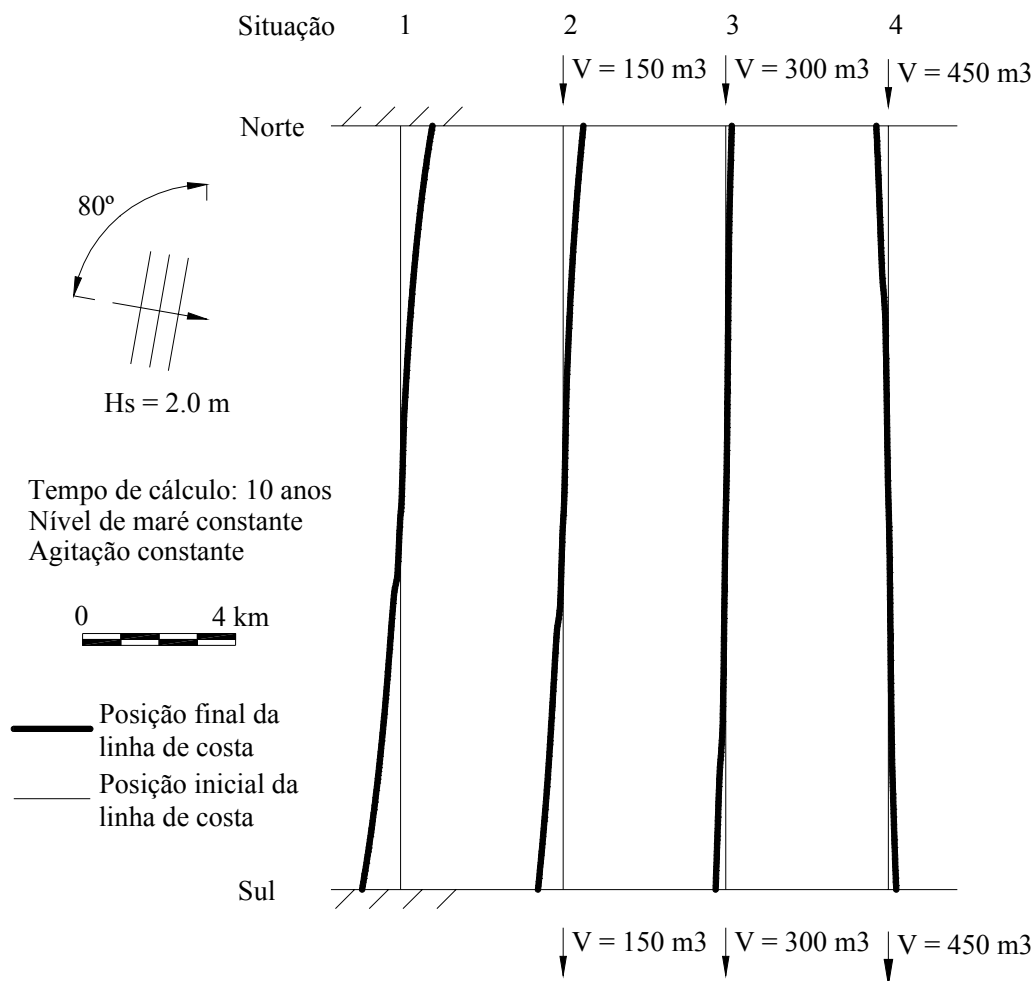


Figura 5.22: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (entrada ou saída de volumes de sedimentos constantes e conhecidos).

A segunda opção consiste na imposição das variações de volume nas secções extremas, para cada instante de cálculo. Quando se conhece que a linha de costa num determinado local não sofre evoluções ao longo do tempo, pode impor-se uma variação volumétrica nula na secção correspondente, o que na prática funciona como um ponto fixo da costa, sem erosão ou acreção. Este tipo de condição fronteira será o mais conveniente nesse caso.

No caso, foram testadas situações de acreção ou erosão constantes e iguais a 5 m<sup>3</sup>/hora. A acumulação de sedimentos nas duas fronteiras origina a formação de uma baía, enquanto a erosão em ambos os extremos da área modelada origina a formação de um cabo.



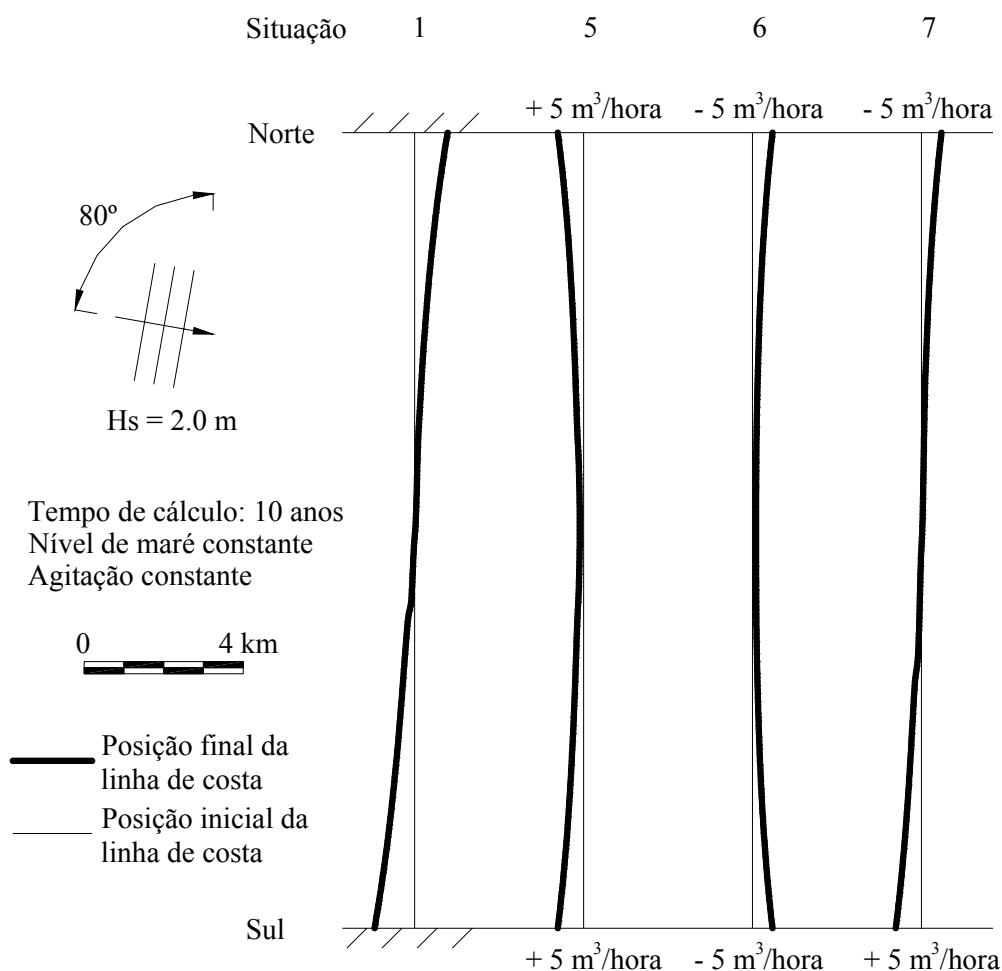


Figura 5.23: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (variação conhecida dos volumes sedimentares, nas secções extremas).

Para a última opção, foram extrapoladas as condições na proximidade das fronteiras da grelha do modelo. Por definição do modelo, a extrapolação recorre à média das condições de transporte sedimentar nos três segmentos de grelha mais próximos. Considerou-se a extrapolação simultânea em ambos os extremos da malha e ainda a extrapolação das condições sedimentares só a Norte ou só a Sul, mantendo o outro extremo sem trocas sedimentares com o exterior da área modelada.

Apesar de pouco perceptível na figura 5.24, nas duas últimas representações existe uma pequena variação da posição da linha de costa nas secções onde são impostas as condições vizinhas de extrapolação, já que a erosão ou acreção se propaga ao longo de toda a extensão do modelo. O défice sedimentar da situação 9 evolui desde Norte, representando ao final de dez anos, um pequeno recuo da linha de costa no extremo Sul. Da mesma forma, a acumulação de sedimentos verificada na situação 10, origina o avanço da linha de costa, que ao longo dos dez anos de cálculo

se propaga até ao extremo Norte. Com períodos de cálculo superiores, a evolução seria mais evidente, com recuos ou avanços da linha de costa, até ser atingida uma posição de equilíbrio.

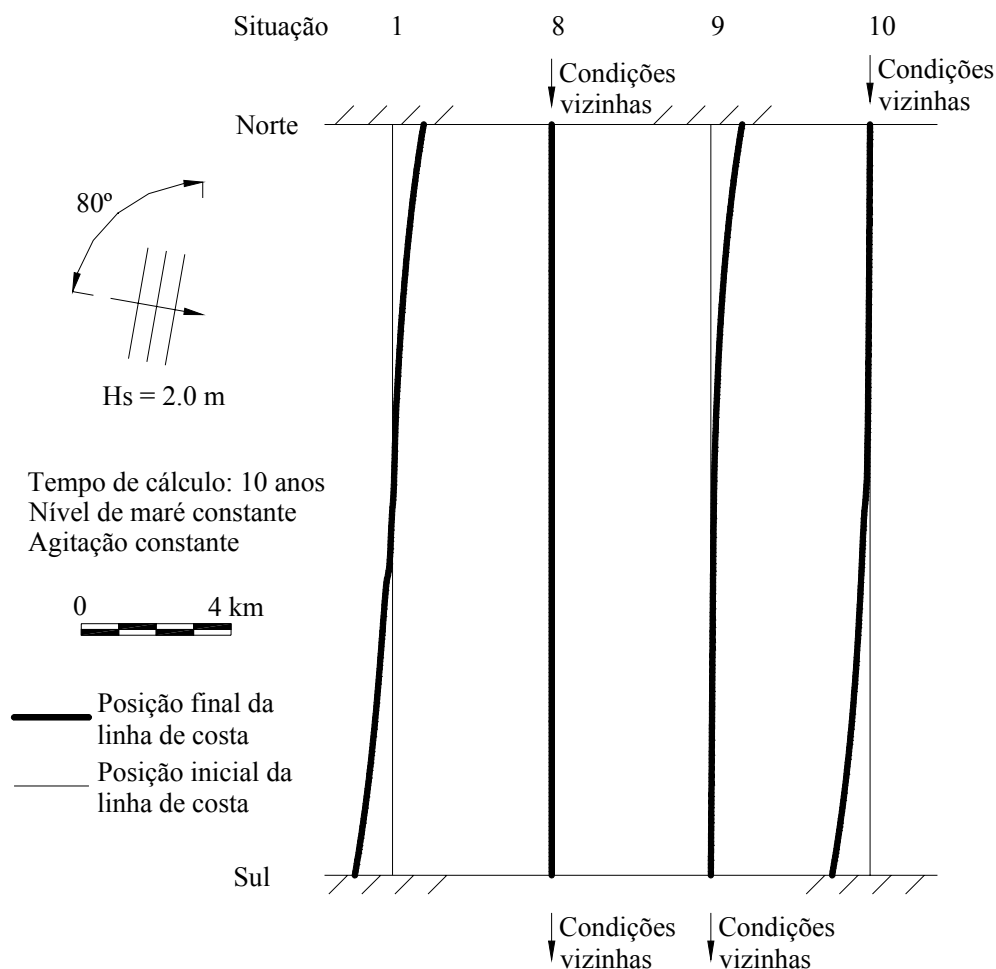


Figura 5.24: Configuração em planta da linha de costa, em função das condições de alimentação sedimentar nas fronteiras (extrapolação das condições de transporte sedimentar vizinhas às fronteiras).

Como se verifica pela análise das figuras anteriores, a orientação da linha de costa não depende só da agitação incidente, mas também está largamente dependente da quantidade de sedimentos em transporte no sistema. Quando o volume sedimentar nas fronteiras é nulo, a direcção da linha de costa aproxima-se da direcção das cristas da onda incidente. Quando existe transporte sedimentar, esse ângulo é condicionado pelos volumes em transporte, podendo mesmo ter uma orientação oposta à das cristas da onda incidente, como acontece na situação 4, representada na figura 5.22. Por alteração das condições na fronteira é possível ter toda a extensão costeira em acreção ou em

erosão, formando pequenas baías ou cabos, ou mesmo mantendo a situação inicial por fornecimento ao modelo de volumes necessários para a manutenção do equilíbrio.

O teste aqui apresentado vem confirmar o referido por Silvester e Hsu (1997) relativamente às configurações da linha de costa em planta, pois só as costas em equilíbrio estático (sem transporte longitudinal) podem ser relacionadas com a agitação e a sua configuração ser prevista pelos modelos de praias enclausuradas. A existência de situações distintas de sedimentos em transporte pode alterar significativamente essa configuração.

Tabela 5.6: Volumes de sedimentos adicionados e retirados nas fronteiras da grelha modelada, no final de dez anos de cálculo.

Situação	Volumes ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Entradas a Norte	0.0	13.1	26.3	39.4	47.8	16.1	16.0	32.1	0.0	32.0
Saídas a Sul	0.0	13.1	26.3	39.4	16.0	47.7	15.9	32.1	32.0	0.0

Para as diversas situações testadas é evidente a grande diferença entre volumes sedimentares fornecidos ou recolhidos nas fronteiras. Para manter a posição da linha de costa a Norte é necessário dar entrada de  $32.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  ao longo dos dez anos de cálculo (tabela 5.6). Apenas as situações 4 e 5 ultrapassam esse valor, registando-se nessas situações o avanço da linha de costa. Da mesma forma, só nas situações 4 e 6 é retirado um volume de sedimentos superior à capacidade de transporte das ondas ao longo dos dez anos, com conseqüente recuo da posição da linha de costa.

#### 4. Avaliação da importância da configuração topográfica

Este teste pretende evidenciar uma lacuna importante na generalidade dos modelos unidimensionais, onde são desprezadas as características topográficas fora do perfil activo, o que reflecte evoluções idênticas em situações distintas de relevo adjacente à costa.

Para este teste são comparados os resultados da situação anterior, com três novas situações topográficas, mantendo sem alterações todas as outras características. Assim, é testado o mesmo perfil imerso, mas com uma maior inclinação na parte emersa (6%) e ainda as anteriores situações

emersas, mas com o perfil imerso que resulta do perfil de equilíbrio de Dean, para  $d_{50} = 0.6$  mm,  $m = 2/3$  e  $A = 0.173 \text{ m}^{1/3}$ .

A figura 5.25 mostra as diferentes variações na posição da linha de costa, nos perfis transversais localizados nos extremos da grelha modelada, realçando a importância da configuração topográfica na evolução da posição da linha de costa. Como foi referido, este aspecto não é considerado pela generalidade dos modelos de uma dimensão, onde alguns parâmetros relacionados com o terreno são considerados para os cálculos (profundidade de fecho, altura da berma emersa, etc.), mas a topografia é ignorada na evolução da linha de costa. Refira-se que admitindo uma evolução da linha de costa até ao equilíbrio (cálculo equivalente a mais de 200 anos) os resultados são também diferentes. Nessa situação, apesar da configuração final da costa ser aproximadamente igual, há uma translação da linha de costa em função da topografia e batimetria.

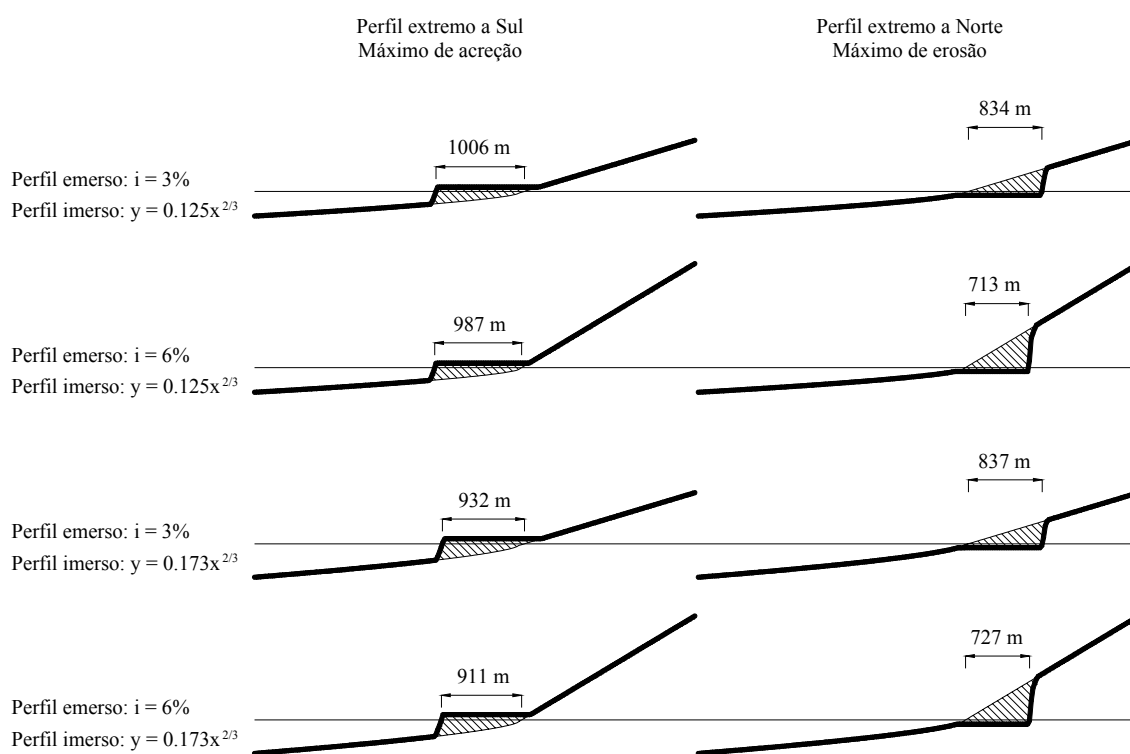


Figura 5.25: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, para diferentes configurações topográficas iniciais.

Como se verifica, a parte emersa tem maior influência na evolução dos perfis em erosão, já que a quantidade de sedimentos que é subtraída ao terreno original provém essencialmente desta zona do perfil. Assim, perfis de cotas emersas mais elevadas vão ter uma evolução de erosão mais lenta, com menor alteração da posição da linha de costa.

Pelo contrário, a parte imersa representa maior influência nos perfis em acumulação, já que a deposição dos sedimentos ocorre nessa zona. Os perfis com menores profundidades têm uma evolução da posição da linha de costa superior, já que os volumes depositados atingem a superfície em menor período de tempo.

As diferenças encontradas nestes exemplos atingem quase os 10% em acreção e os 15% em erosão. O facto de se fazer variar a parte emersa sem variar a parte imersa tem pouco significado nos resultados de acreção. Da mesma forma, a influência do perfil imerso nas erosões registadas é de cerca de 2%.

#### *5. Avaliação da importância da escolha das expressões a utilizar*

Com este teste pretende-se avaliar a importância da definição da profundidade de fecho e da quantificação dos potenciais volumes de transporte de sedimentos. Em relação ao teste inicial, foram portanto alterados os parâmetros que correspondem à forma de cálculo destes dois conceitos. No caso da profundidade de fecho, são comparados os cálculos com base na expressão de Hallermeier (equação 4.101) e na expressão de Birkemeier (equação 4.102). Na avaliação do potencial de transporte sólido longitudinal são utilizadas a fórmula CERC (equação 4.121) e a expressão de Kamphuis (equação 4.127).

Como se verificou anteriormente, a fórmula de Birkemeier representa em geral profundidades cerca de 30% menores que a fórmula de Hallermeier. Para o exemplo estudado, sendo a altura de onda significativa ao largo de 2.0 m, as profundidades de fecho correspondem a 4.29 m (Hallermeier) e 3.27 m (Birkemeier). Em geral, a fórmula CERC também traduz volumes de transporte de sedimentos superiores aos obtidos pela expressão de Kamphuis. Neste caso, a comparação da fórmula CERC e da fórmula de Kamphuis conduz a valores de transporte iniciais de 367 m<sup>3</sup>/hora e de 208 m<sup>3</sup>/hora, respectivamente.

Sendo a profundidade de fecho inferior, a aplicação da fórmula de Birkemeier também traduz larguras de perfil activo inferiores às de Hallermeier. No entanto, esse facto não é perceptível nos resultados. Para a mesma diferença de volumes de sedimentos, as menores larguras activas originam maiores variações de cotas altimétricas para cada ponto e em cada iteração do cálculo (porque o mesmo balanço volumétrico é dividido por uma menor extensão e um menor número de pontos). Esse facto justifica a rápida evolução da posição da linha de costa quando utilizada a

fórmula de Birkemeier. O mais rápido ajuste da configuração da costa ao equilíbrio reduz os volumes de sedimentos em transporte.

As tabelas 5.7 e 5.8 resumem os factos descritos. Também se pode referir que a evolução do cálculo até ao equilíbrio da costa conduz nas quatro situações estudadas a resultados todos eles distintos, apesar de próximos entre si. Recorde-se que para a aplicação da fórmula CERC é definido um coeficiente empírico e adimensional, que se considerou igual a 0.39. A variação deste coeficiente pode traduzir diferenças nos resultados, podendo aproximar os valores das duas expressões. As tabelas seguintes representam alguns dos resultados, também visíveis na figura 5.26. Só a calibração com situações concretas pode definir a melhor opção de cálculo.

Tabela 5.7: Resultados da variação da posição da linha de costa nas secções extremas do modelo, para diferentes considerações de cálculo.

	CERC		Kamphuis	
	Hallermeier	Birkemeier	Hallermeier	Birkemeier
Recuo no extremo Norte (m)	834	879	785	782
Avanço no extremo Sul (m)	1006	1033	911	960

Tabela 5.8: Resultados da variação de volumes de sedimentos nas secções extremas do modelo, para diferentes considerações de cálculo.

	CERC		Kamphuis	
	Hallermeier	Birkemeier	Hallermeier	Birkemeier
Erosão no extremo Norte (m <sup>3</sup> /m)	9255	8958	8995	8230
Deposição no extremo Sul (m <sup>3</sup> /m)	8132	7806	7017	7000

Os menores volumes sedimentares em transporte que resultam da expressão de Kamphuis implicam que a situação ao fim dos 10 anos de cálculo esteja mais afastada do equilíbrio, sendo a zona central da área modelada ainda pouco afectada por variações da posição da linha de costa, contrastando visivelmente com a situação obtida pela expressão CERC. Nessa zona praticamente inalterada, a largura activa em cada instante coincide com a área activa final e como se constata na figura, os resultados são menores para a expressão de Birkemeier. As diferenças entre as expressões CERC e Kamphuis traduzem cerca de 10% de variação na posição da linha de costa, enquanto as fórmulas de Hallermeier e Birkemeier podem ultrapassar ligeiramente os 5% de

variação. Os volumes finais de sedimentos que resultam em cada secção podem variar em mais de 15%, comparando as fórmulas CERC e de Kamphuis. Para as diferentes profundidades de fecho, as implicações nestes resultados são inferiores a 10%.

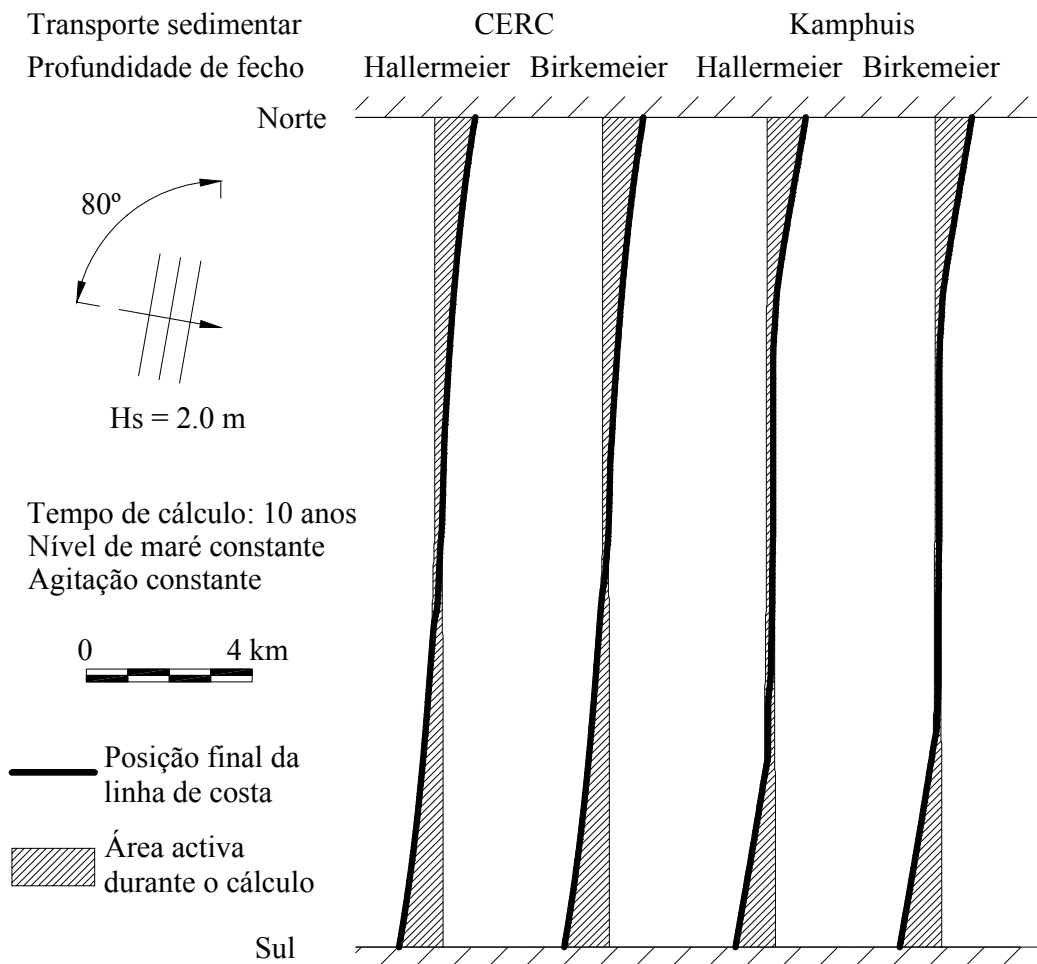


Figura 5.26: Configuração em planta da linha de costa e delimitação das áreas activas, para diferentes considerações de cálculo.

#### 6. Avaliação da importância das inclinações a adoptar para a evolução dos perfis transversais

Como se verificará, a evolução da forma dos perfis transversais é fundamental nos resultados de previsão da linha de costa. Este é dos aspectos mais difíceis de reproduzir em modelo, devido aos diversos fenómenos envolvidos (principalmente relacionados com o comportamento do perfil transversal) e que um modelo de transporte sedimentar longitudinal correntemente não permite simular. Ao contrário de outros modelos, no modelo agora desenvolvido admite-se que o perfil transversal não se mantém constante ao longo do cálculo. A abordagem de diferentes alternativas

de cálculo da evolução dos perfis transversais permite avaliar qual a que melhor representa a situação de estudo, potenciando o modelo. No entanto, é evidente a necessidade de desenvolver trabalho futuro para melhor representar a evolução de perfis transversais em erosão ou acreção.

São apresentadas oito situações distintas para testar o comportamento dos perfis transversais e respectivas consequências na evolução da linha de costa. São conjugadas diferentes considerações de inclinação da praia imersa, inclinações da praia emersa, assentamentos dos fundos e ângulo de atrito interno dos sedimentos. As situações correspondem ao descrito na figura 5.27. Nesta figura são apresentados os perfis nas secções extremas da malha modelada, ao final do tempo de cálculo.

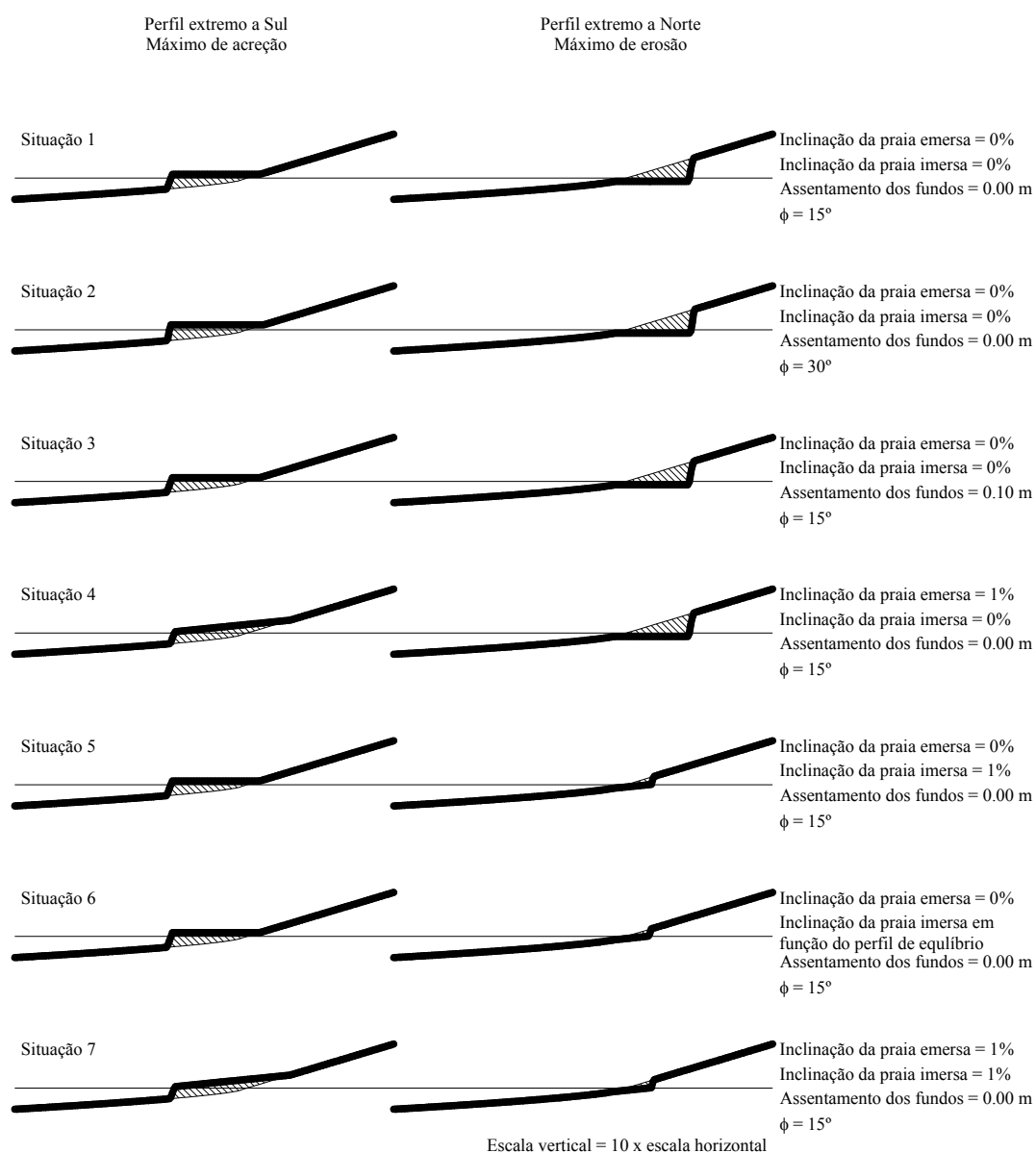


Figura 5.27: Perfis transversais nas secções extremas do modelo, para diferentes condições de evolução da forma dos perfis.



A definição da inclinação mínima da praia imersa tem interesse na evolução de perfis em erosão, podendo ser adoptada nula (situação que na prática tem semelhanças com as admitidas por outros modelos), ou positiva. Neste caso, o plano da praia imersa em contínua erosão e com pendente positiva atingirá no limite a parte emersa da praia (na figura 5.27, as situações 5 a 8). A partir desse instante, admite-se que foi atingido o equilíbrio da secção, sendo o déficit sedimentar compensado por secções a sotamar. Em planta, o efeito de erosão propaga-se para Sul numa extensão superior às situações analisadas anteriormente (ver a figura 5.28). A erosão na secção extrema da malha é no entanto inferior, pois a partir de uma fase intermédia do cálculo deixa de existir alteração na secção, que permanece em equilíbrio.

A inclinação imersa pode também ser calculada em cada instante, em função da profundidade de fecho, no caso da variável INCI ser adoptada negativa. Na adopção deste pressuposto, a inclinação imersa respeita as tangentes ao perfil de equilíbrio de Dean. Este caso, representado pelas situações 6 e 7 é adequado para situações de profundidades de fecho variáveis ao longo do tempo (marés ou agitação marítima variáveis), pelo que, neste exemplo funciona como uma inclinação praticamente constante, dependendo do parâmetro de escala  $A$  (dependente da granulometria) e da largura activa de cada perfil. Na situação 6, porque a granulometria considerada é de menor dimensão, a inclinação é também menor do que a obtida na situação 7.

A definição da inclinação mínima da praia emersa está associada ao comportamento dos perfis em acreção. Na realidade, a variável INCS permite estender a deposição de sedimentos na zona de cotas superiores do perfil, reduzindo a velocidade com que a posição de linha de costa avança. Por definição do modelo, esta opção tem que ser sempre igual ou superior a zero. Nas situações estudadas, apenas em duas se considerou uma inclinação emersa positiva e igual a 1%.

O ângulo de atrito de sedimentos permite controlar a maior ou menor verticalidade das frentes em erosão ou acreção. Em erosão, o menor atrito conduz à ocorrência de deslizamentos com maior facilidade, com deposição de sedimentos que retardam um pouco a erosão. Da mesma forma, em acreção o escorregamento de sedimentos para zonas mais profundas reduz a velocidade de avanço da linha de costa. No entanto, as implicações que resultam de adoptar o ângulo de atrito interno dos sedimentos em 15° ou 30° não têm significado importante (inferior a 5%) nos resultados obtidos neste exemplo.

O exemplo apresentado para a aplicação da variável DLP não representa variação perceptível nos resultados. O facto da profundidade de fecho corresponder sempre ao mesmo local impede que a

perda de sedimentos seja importante. Regista-se apenas um ligeiro aumento da profundidade a que a erosão do perfil vai evoluindo. Esta profundidade depende também da discretização dos pontos da grelha.

A tabela resume os resultados principais. Como já ficou exposto, os casos em que a inclinação emersa da praia é superior (situações 4 e 8) registam maiores volumes de acumulação, mas com a posição da linha de costa a avançar menos, já que os sedimentos se acumulam na parte alta do perfil. A inclinação positiva da praia imersa permite atingir situações de equilíbrio (principalmente no caso da profundidade de fecho ser constante, o que se relaciona directamente com o facto da não consideração de marés e de considerar a altura de ondas constante). Daí resultam volumes de erosão na secção extrema inferiores aos restantes casos, mas essa erosão propaga-se numa maior extensão em planta (ver figura 5.28). Devido à extensão da área modelada, as considerações admitidas para as zonas em erosão têm consequências insignificantes nas zonas em acreção, sendo o recíproco também verdadeiro.

Tabela 5.9: Resultados nas secções extremas do modelo, para as diferentes situações apresentadas na figura 5.27, em função das inclinações adoptadas.

	Volumes (m <sup>3</sup> /m)		Distâncias (m)	
	Extremo Sul	Extremo Norte	Extremo Sul	Extremo Norte
Situação 1	+8132	-9255	+1006	-834
Situação 2	+7816	-8933	+1026	-857
Situação 3	+8132	-9254	+1006	-834
Situação 4	+8836	-9257	+958	-834
Situação 5	+8140	-2313	+1007	-300
Situação 6	+8162	-10090	+1009	-722
Situação 7	+8102	-1945	+1004	-273
Situação 8	+8847	-2313	+958	-300

A visualização da configuração da linha de costa em planta, para as diversas situações, realça principalmente a consequência das inclinações positivas da praia imersa conduzirem ao equilíbrio da secção e à propagação do recuo da linha de costa para sotamar. As situações 5 a 8 apresentam erosões em maiores extensões.

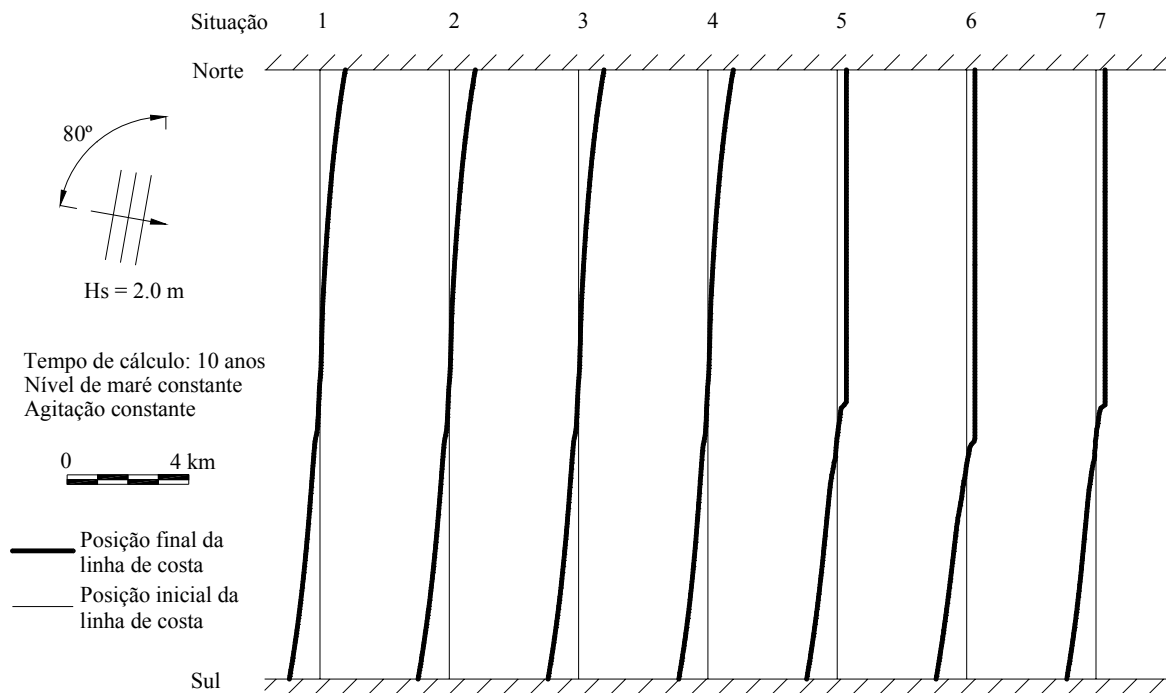


Figura 5.28: Configuração em planta da linha de costa, para as diferentes condições de evolução da forma dos perfis.

### 7. Testes de simulação de fontes aluvionares pontuais

A opção de introdução de fontes aluvionares na modelação pretende permitir a simulação do efeito de um rio ou mesmo de uma alimentação artificial por bombagem. Esta simulação está actualmente limitada, já que o volume de sedimentos que entra na área modelada é considerado constante ao longo do tempo (pode ser um dos aspectos a desenvolver e melhorar em próximas versões do modelo).

A figura 5.29 mostra o resultado de quatro testes efectuados, realçando a importância das alimentações sedimentares pontuais na configuração da linha de costa. Com a fonte sedimentar localizada a 1000 m da fronteira Norte e com capacidade de 300 m<sup>3</sup>/h (valor próximo da capacidade de transporte da onda nas condições iniciais de configuração da costa), verifica-se que há uma redução significativa da erosão a Norte. Se a alimentação for de 600 m<sup>3</sup>/h, passa a existir acreção em toda a extensão da área modelada. A Norte da fonte aluvionar, o transporte sedimentar passa a ser no sentido Norte-Sul, com consequente deposição de sedimentos e respectivo avanço da linha de costa, por estar impedida a troca sedimentar na fronteira. No caso da alimentação sedimentar ocorrer a meia distância das fronteiras do modelo, o benefício para Norte não é significativo, sendo visível no entanto o avanço da linha de costa a Sul da fonte sedimentar. Com a

existência em simultâneo de dois pontos de entrada sedimentar, quase toda a extensão da linha de costa avança, sendo a Norte da fonte aluvionar localizada mais a Norte que ocorre a única zona em erosão.

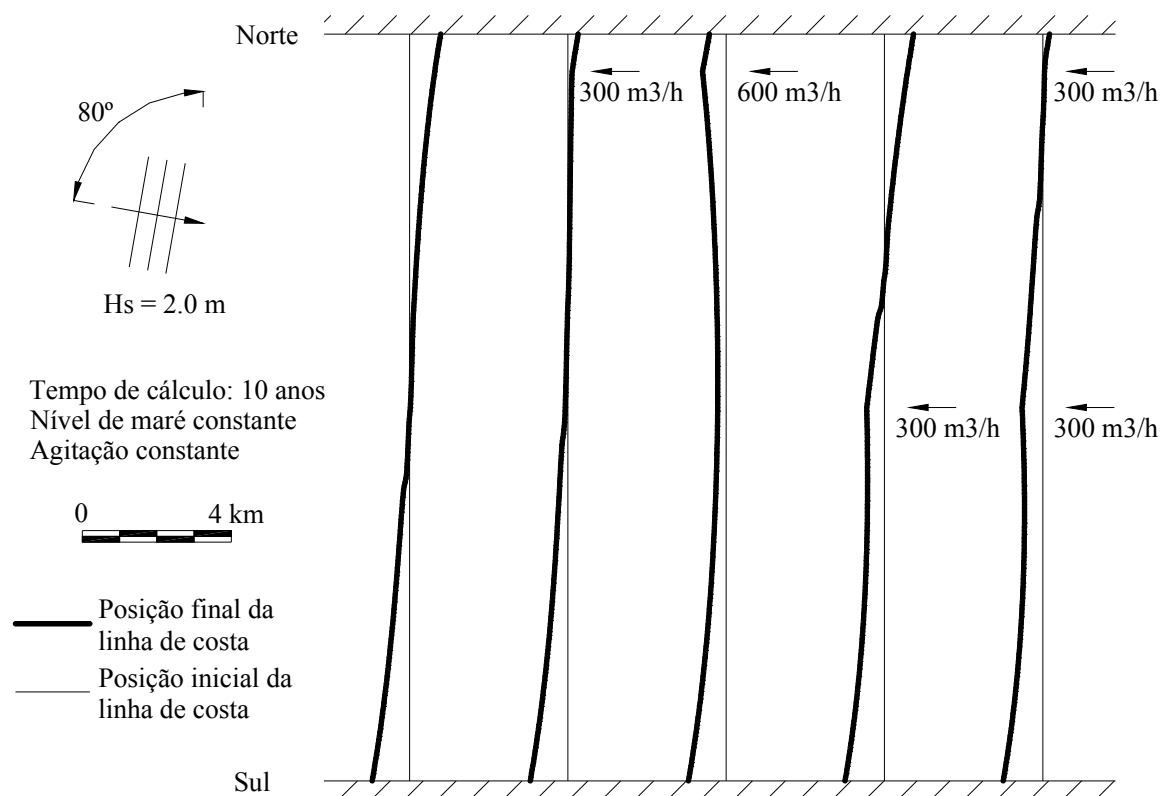


Figura 5.29: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes fontes aluvionares.

A tabela 5.10 resume a posição da linha de costa em quatro secções singulares, correspondentes aos extremos da área modelada e aos pontos de fornecimento sedimentar. A secção do extremo Norte do modelo é significativamente influenciada por qualquer das situações testadas. Realça-se o facto de, mesmo no caso em que a fonte de sedimentos se localiza a dez quilómetros a sotamar, ocorrer uma redução de erosão na secção Norte.

Os efeitos das fontes aluvionares no extremo Sul são reduzidos, apesar da existência da fonte sedimentar a igual distância das fronteiras provocar algum avanço da posição da linha de costa. Os principais efeitos ocorrem na zona intermédia, onde a posição de equilíbrio da linha de costa avança significativamente em relação à situação de referência.

Tabela 5.10: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes fontes aluvionares.

Secções	Distância da linha de costa à posição inicial (m)				
	Sem fonte aluvionar	300 m <sup>3</sup> /h a 1000 m do Norte	600 m <sup>3</sup> /h a 1000 m do Norte	300 m <sup>3</sup> /h a meio	Duas fontes aluvionares
Extremo Norte	-834	-275	+452	-780	-182
A 1000 m do Norte	-675	-111	+638	-620	-45
A meio	-18	+73	+229	+478	+558
Extremo Sul	+1006	+1011	+1016	+1061	+1063

#### 8. Testes de simulação de alimentação artificial de areias

A alimentação artificial de zonas costeiras, com areias provenientes de áreas exteriores ao sistema costeiro em análise, tem vindo a ser utilizada como forma de intervenção de defesa e como tal, é importante a modelação dos seus efeitos. Uma análise genérica, mas pormenorizada do comportamento da alimentação artificial no modelo desenvolvido é permitida pela visualização da figura 5.30. Este exemplo permite comprovar mais facilmente o comportamento do modelo.

Neste estudo foi aplicada uma situação de agitação constante e perpendicular à costa. Verifica-se um comportamento que respeita as características de simetria, onde a forma irregular da linha de costa que resulta da alimentação artificial vai sendo esbatida no tempo. Para estas condições, e porque a alteração dos fundos altera a propagação das ondas até à rebentação (refracção), a linha de costa converge para uma posição de equilíbrio que não corresponde a uma recta, mas ao cabo pouco pronunciado que se verifica na última linha representada.

No perfil transversal é visível a forma de colocação da areia no perfil, onde a cota de todos os pontos abrangidos pela área de intervenção é somado um valor uniforme que resulta da distribuição do volume de sedimentos da alimentação. O modelo procede de forma imediata à redistribuição dessas cotas, de forma a impedir a existência de inclinações negativas no perfil e a manter os volumes introduzidos. A redistribuição é realizada para zonas de cotas superiores do perfil transversal.

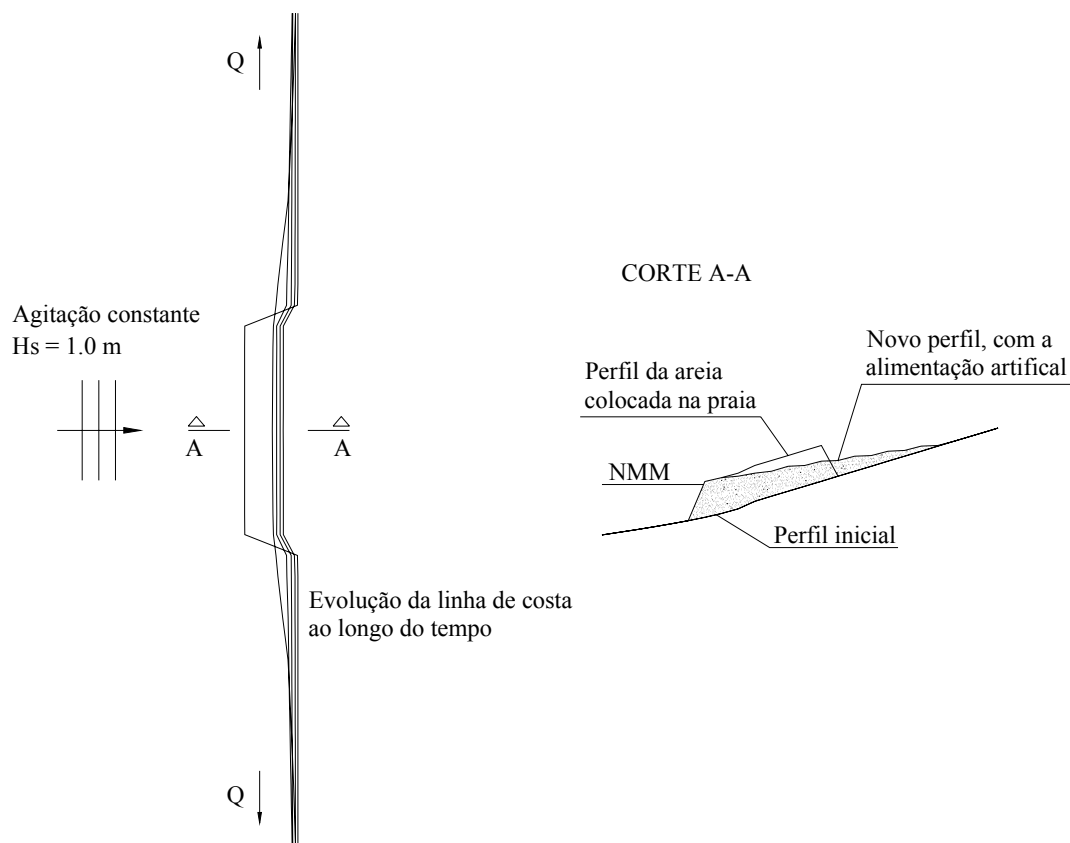


Figura 5.30: Comportamento da linha de costa após a alimentação artificial duma praia.

Em relação aos testes de referência, foram experimentadas as diversas capacidades do modelo no cálculo do efeito da alimentação artificial de areias. Foi simulada uma alimentação em 1000 h, desde o início do cálculo, ou dividida em duas alimentações de 500 h, separadas na sua execução em cinco anos. Foram testadas áreas diferentes (em extensão e profundidade) para a localização dos depósitos e foi também considerada uma divisão em duas áreas distanciadas entre si, dois quilómetros.

Para as diversas situações e ao final de dez anos de cálculo, não se registam diferenças significativas de resultados, por diluição do efeito da alimentação sedimentar no tempo. A tabela 5.11 mostra a variação da posição da linha de costa nas secções extremas do modelo e a meia distância das fronteiras, para os diversos testes efectuados.

Tabela 5.11: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes alimentações artificiais.

Distância da linha de costa à posição inicial (m)						
Secções	Sem	Alimentação de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ de sedimentos				
	alimentação	No início	Em duas vezes	Em extensão	Em profundidade	Em dois locais
Extremo Norte	-834	-726	-681	-715	-723	-722
Meio	-18	+33	+47	+40	+38	+36
Extremo Sul	+1006	+1010	+1009	+1010	+1011	+1010

A alimentação de areias dividida por dois períodos de intervenção parece ser a solução que traduz melhores resultados, mas há que notar que o efeito da alimentação vai diluir-se no tempo, pelo que no caso de não existirem mais recargas, os resultados tenderiam a convergir no tempo.

Parece que ao fim de dez anos, a alternativa que conduz a melhor resultados a sotamar da alimentação é a solução que coloca os sedimentos em zonas mais profundas. Na análise dos efeitos a barlamar das intervenções, os melhores resultados são conseguidos quando a intervenção se estende até uma zona mais próxima da área a barlamar.

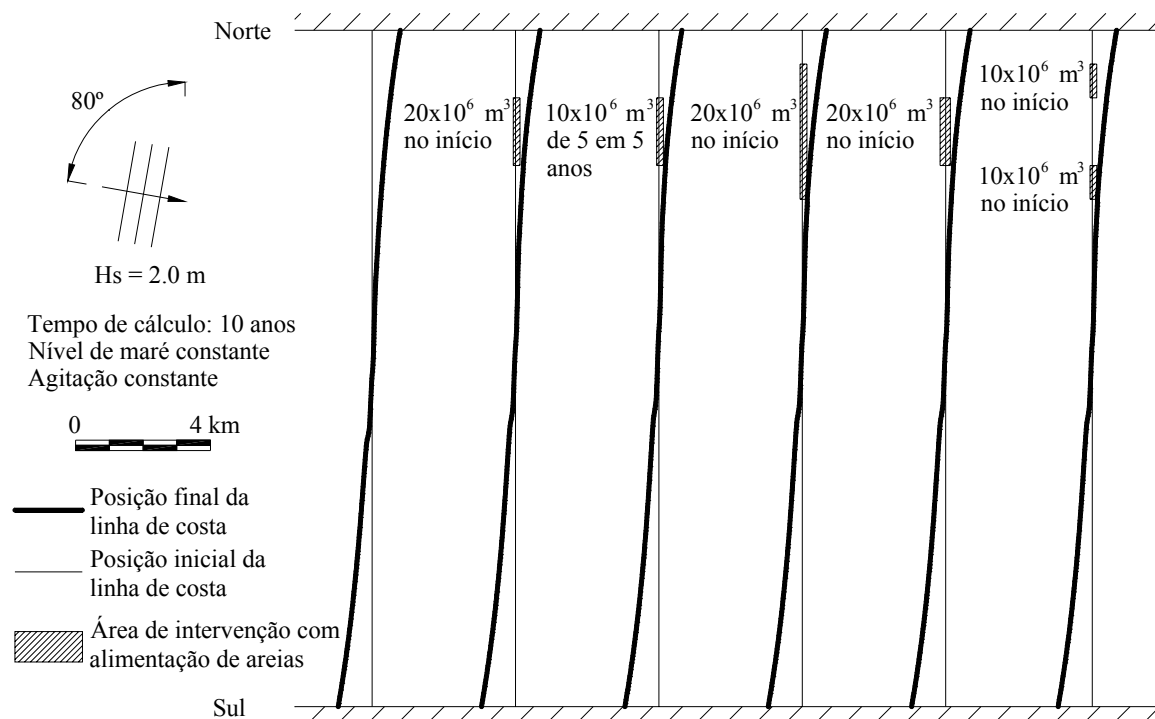


Figura 5.31: Configuração em planta da linha de costa, para diferentes alimentações artificiais.

De facto, os  $20 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos introduzidos, devido ao transporte sedimentar, são distribuídos por toda a área do modelo. O maior efeito na região Norte resulta da proximidade aos locais da alimentação. Este efeito tenderá a diminuir até que seja atingido o equilíbrio. O volume de sedimentos adicionado ao sistema origina um avanço de todos os pontos da linha de costa em relação à situação sem alimentação. Caso não seja assegurada a fixação das areias na área de intervenção, a capacidade de transporte da agitação marítima remove os sedimentos, diluindo o efeito da alimentação artificial.

#### *9. Testes de simulação de esporões e campo de esporões*

A utilização de esporões como obras de defesa costeira tem repercussões numa extensão de costa a barlar e a sotamar da intervenção. Para testar o comportamento do modelo a estas estruturas foram consideradas diferentes situações, onde se variou o número de esporões e o comprimento do próprio esporão. Esta análise não engloba um estudo de viabilidade de construção da obra nem o custo económico da sua realização (boas soluções aparentes podem não ser viáveis ou ser economicamente inoportáveis). O modelo supõe ainda que não existem danos na estrutura que comprometam a sua função de retenção, pelo que a posição do esporão permanece inalterada no tempo (o que exigirá intervenções de manutenção periódicas).

Efectuando uma análise em pormenor do que se passa na envolvente próxima de um esporão, pode visualizar-se um comportamento semelhante ao referido pela teoria de Pelnard-Considére. Na figura 5.32, a linha final correspondente a uma posição próxima do equilíbrio. À medida que se verifica o enchimento do lado a barlar do esporão, existe défice sedimentar a sotamar, com consequente recuo da linha de costa. Ao longo do tempo, o avanço da linha de costa a barlar do esporão permite que se verifique passagem de sedimentos para sotamar, reduzindo a taxa de erosão a sotamar e originando uma configuração da linha de costa em equilíbrio.



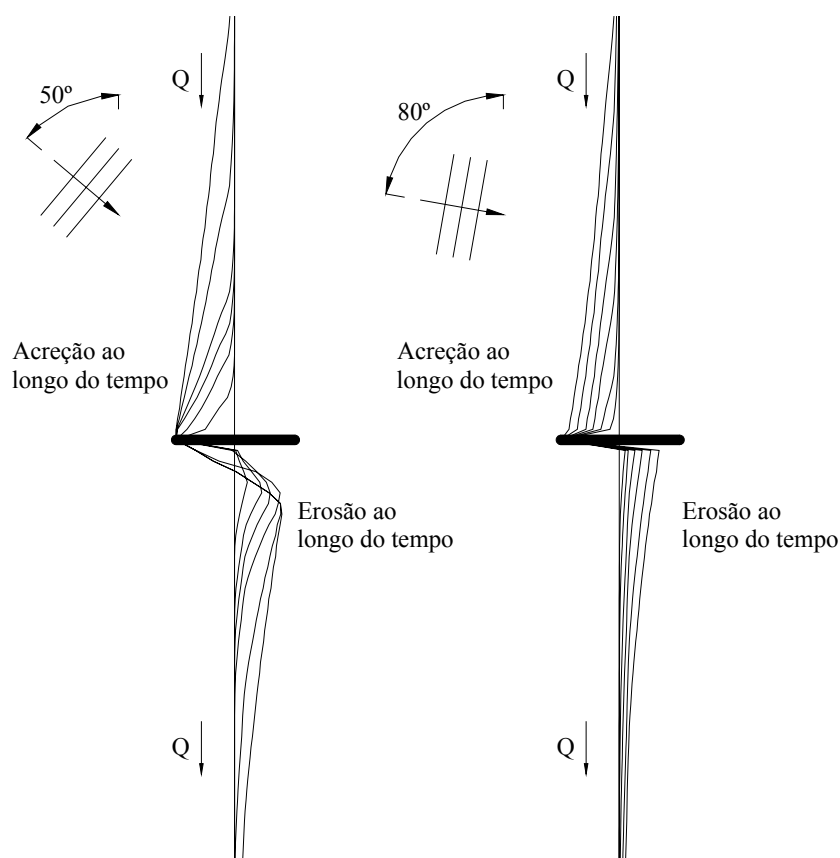


Figura 5.32: Comportamento da linha de costa nas proximidades de um esporão, para duas situações de proveniência da agitação.

Para o espaçamento longitudinal utilizado entre os pontos da malha modelada, a situação de agitação em que as ortogonais à crista da onda realizam um ângulo de 80° com a linha de costa, corresponde a um só ponto da malha na sombra do esporão e sob o efeito da difracção. Deste modo, o comportamento do modelo relativamente a este fenómeno não é muito perceptível. Na situação de maior obliquidade entre a agitação incidente e o esporão, a zona de sombra localizada a sotamar da obra de defesa aumenta, provocando a deposição de sedimentos nas proximidades a sotamar do esporão e afastando da obra de defesa o ponto de maior recuo da linha de costa.

O modelo aplica o efeito de difracção das ondas quando encontra um obstáculo como os esporões. Nos testes efectuados, o facto da distância longitudinal entre pontos do modelo ser relativamente elevada, não permite a visualização em pormenor do comportamento da costa na proximidade a sotamar do esporão.

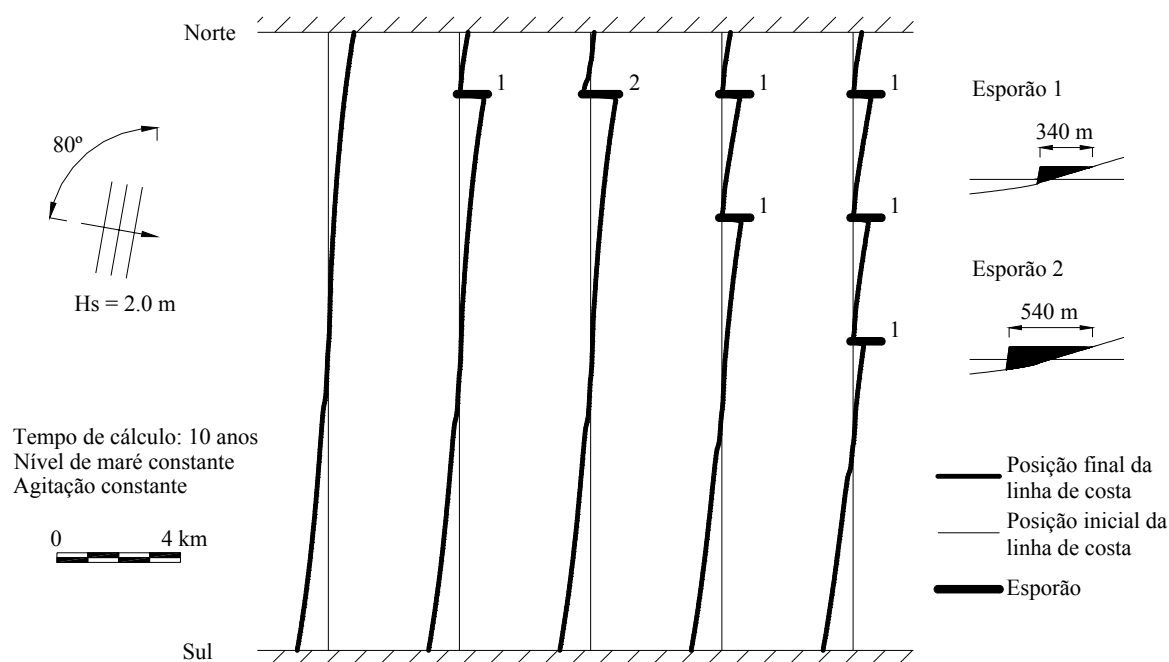


Figura 5.33: Configuração em planta da linha de costa, para teste ao efeito de diferentes esporões.

A figura 5.33 permite constatar que realmente existem benefícios a Norte das intervenções, com os níveis de erosão a reduzirem substancialmente devido à retenção de sedimentos pelos esporões. No entanto, a sotamar verifica-se que a linha de costa recua mais do que numa solução sem intervenções. O facto de se construírem campos de esporões para Sul não altera a situação a Norte, conduzindo a melhorias para a região mais a Sul. Quando o comprimento do esporão é superior, os benefícios a barlamar aumentam de forma significativa, havendo ligeiros impactes negativos nos resultados a sotamar.

A tabela 5.12 representa a distância da posição da linha de costa nas secções extremas do modelo, bem como nas secções que correspondem a barlamar e a sotamar do campo de três esporões. Na tabela também é indicada a extensão da zona Sul, onde se registaram avanços da linha de costa. É evidente que a construção de esporões mais compridos ou em maior número, aumenta o efeito da retenção de sedimentos, pelo que é reduzida a extensão de costa em acreção, para sotamar.

No caso em que é utilizado um esporão de 340 m de comprimento, localizado a 2000 m da fronteira Norte do modelo, verifica-se que existem benefícios a barlamar (Norte), reduzindo a erosão e atingindo uma posição de equilíbrio com um menor recuo da linha de costa. Devido à retenção de areias do lado Norte do esporão, a Sul registam-se agravamentos de erosão.

Tabela 5.12: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes esporões e campos de esporões.

	Distância da linha de costa à posição inicial (m)				
	Sem esporões	Esporão 1	Esporão 2	Dois esporões	Três esporões
Extremo Norte	-834	-282	-116	-282	-282
a 1900 m do Norte	-555	-19	+224	-19	-19
a 2100 m do Norte	-528	-795	-787	-584	-584
a 5900 m do Norte	-193	-323	-342	-14	-14
a 6100 m do Norte	-181	-304	-323	-623	-502
a 9900 m do Norte	-23	-58	-64	-167	-6
a 10100 m do Norte	-9	-52	-58	-149	-345
Extremo Sul	+1006	+1003	+1001	+992	+971
Extensão de costa em acreção	9794	8968	8806	7723	6625

A eventual existência de formações rochosas naturais, com configurações em planta perpendiculares à linha de costa pode ser considerada no modelo, de uma forma análoga à adotada para os esporões.

#### 10. Testes de simulação de obras longitudinais aderentes

A modelação do comportamento das obras longitudinais aderentes pressupõe que é impedida a erosão dos perfis protegidos pelas obras aderentes. Para demonstrar as potencialidades do modelo, foram testadas quatro situações, em que se fez variar o comprimento das obras aderentes, e em que se simularam no mesmo modelo duas obras aderentes no mesmo alinhamento longitudinal e em dois alinhamentos distintos, afastados 400 m, sendo o de Norte mais recuado.

A figura 5.34 permite verificar os resultados da configuração em planta da linha de costa, para os diferentes testes.

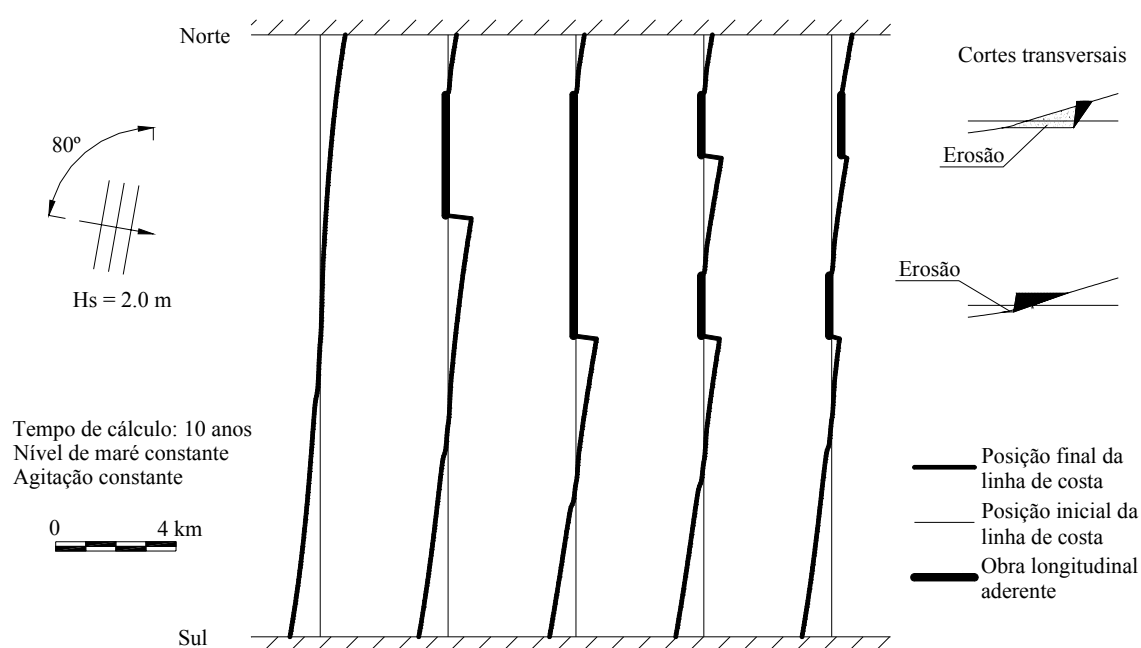


Figura 5.34: Configuração em planta da linha de costa, para teste ao efeito de diferentes obras de defesa longitudinal.

A utilização das obras aderentes reduz o efeito de erosão a barlamar da obra, eliminando também o recuo da linha de costa nas zonas protegidas. No entanto, verifica-se o agravamento das condições a sotamar. A tabela seguinte regista os valores de variação da posição de linha de costa, em relação à situação inicial, para três secções.

Tabela 5.13: Distância da posição da linha de costa em relação à situação inicial, para diferentes obras longitudinais aderentes.

	Distância da linha de costa à posição inicial (m)				
	Sem obras	Obra de 4 km	Obra de 8 km	Duas obras	Obra recuada
Extremo Norte	-834	-282	-282	-282	-676
a 9900 m do Sul	-9	-236	-683	-521	-260
Extremo Sul	+1006	+975	+879	+934	+988

É interessante verificar que devido às hipóteses e formulações admitidas no modelo, o comportamento a Norte de uma obra de defesa aderente ou de um esporão, localizado no mesmo local e com a frente na mesma posição, resulta idêntico. O modelo pressupõe que as obras de

defesa longitudinal mantêm a sua funcionalidade ao longo do tempo, pelo que exigem operações de manutenção e de possível reforço das zonas das extremidades, face à progressão da erosão.

A existência de formações rochosas com configuração em planta paralelas à linha de costa pode ser considerada no modelo, de uma forma análoga à adoptada para as obras de defesa longitudinal.

### *11. Avaliação da importância das marés*

Testam-se neste exemplo as implicações de diferentes níveis de água (traduzindo o efeito das marés) nos resultados de evolução da linha de costa. Nos exemplos testados até aqui, o nível da água foi mantido constante. Em situações reais, a ocorrência de marés astronómicas, meteorológicas e ainda do efeito da subida do nível do mar alteram o nível de água em cada instante.

Nos pressupostos do modelo só resultam variações altimétricas nos perfis transversais por balanço sedimentar devido ao transporte sólido longitudinal por acção das ondas, pelo que a alteração do nível da água não traduz efeitos se não estiver associada a nenhuma onda. Na prática, o modelo considera o nível de água apenas na definição da área activa em cada instante de cálculo.

O facto da profundidade de fecho ser contabilizada desde o nível das águas e deste oscilar mediante a maré admitida, conduz a uma questão importante na forma de evolução dos perfis. A largura activa em cada instante vai alternar entre zonas mais ou menos profundas consoante o nível do mar, permitindo a subtracção ou deposição de sedimentos em áreas distintas em cada instante do cálculo. Quando as inclinações mínimas da praia imersa e da praia emersa são definidas constantes, o processo de cálculo dependente do nível da água do mar pode originar plataformas de evolução da erosão ou deposição de sedimentos a várias cotas (visíveis na representação do perfil transversal exposta na figura 5.36), proporcionando irregularidades na configuração em planta da linha de costa.

Na realidade, as costas arenosas ainda que globalmente consideradas de configuração rectilínea em planta, evidenciam “irregularidades” geométricas (hidroformas), frequentemente variáveis, no tempo e no espaço. Essas macroirregularidades e microirregularidades geométricas são de grande dinâmica espacial e temporal (Pais-Barbosa *et al.*, 2003). São essencialmente a variação do nível da água e os efeitos de corrente que estão associadas à formação e dinâmica dessas hidroformas. No

entanto, porque apresentam grande irregularidade no tempo e no espaço, não são objecto de estudo e de modelação no âmbito da presente dissertação.

Para avaliar a importância das marés, além da situação base, que mantém o nível da água constante no tempo, foram testados outros cinco casos. Foi simulado o efeito de uma maré astronómica com amplitudes de marés vivas de 3.6 m e amplitudes de marés mortas de 2.0 m, equivalente ao exemplo apresentado na figura 5.14. Foi efectuada a aplicação de uma maré meteorológica, com variações do nível da água a ocorrerem aleatoriamente entre os -0.20 m e +0.20 m do nível médio. Modelou-se a sobreposição do efeito de ambas as marés. Simulou-se ainda o efeito da subida do nível do mar em 5 mm/ano e a sobreposição da subida do nível do mar em simultâneo com ambos os tipos de maré.

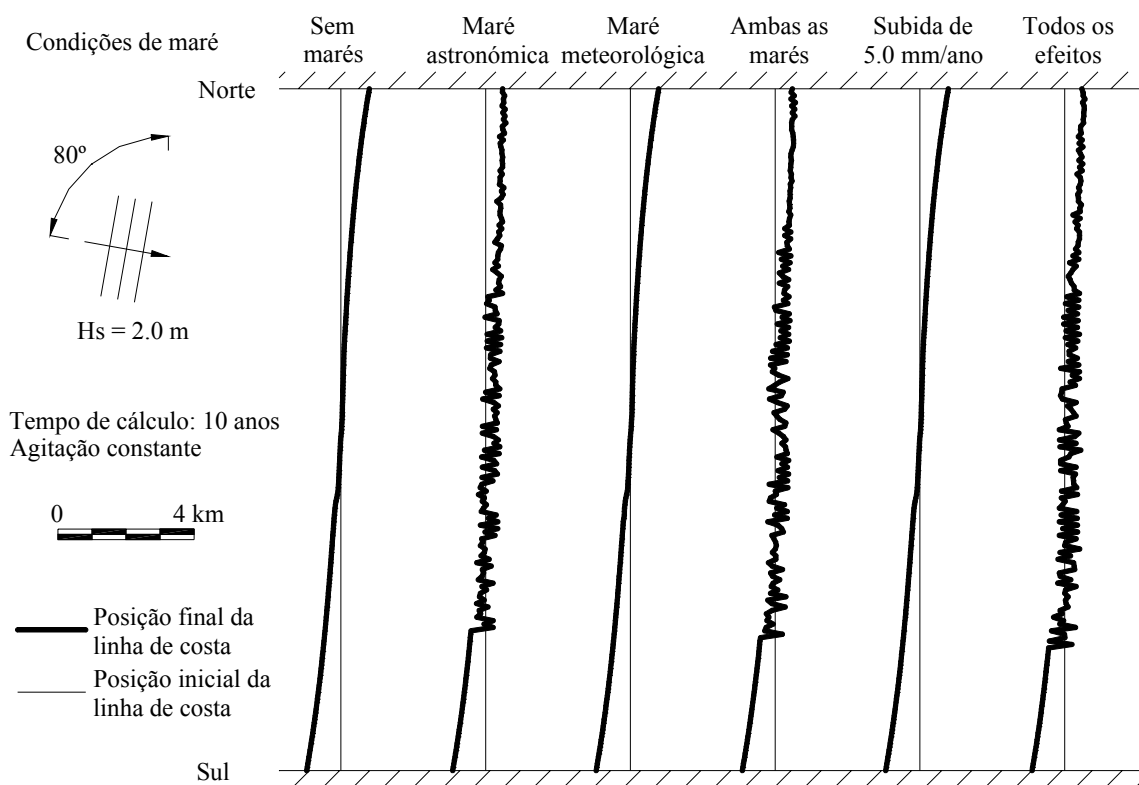


Figura 5.35: Configuração em planta da linha de costa, em função de diferentes considerações de maré.

Como a evolução imersa do perfil foi admitida horizontal, os resultados são do tipo dos expostos no perfil transversal representado na figura 5.36. Como consequência, a linha de costa nestes casos pode apresentar bastantes irregularidades geométricas (semelhantes às hidroformas atrás referidas). Numa zona fora de equilíbrio e em transformação de cotas, a camada de fundo pode situar-se

ligeiramente abaixo do nível médio e na secção vizinha a sotamar estar ainda ligeiramente acima, representando uma distância significativa em planta e as irregularidades visíveis na figura 5.34.

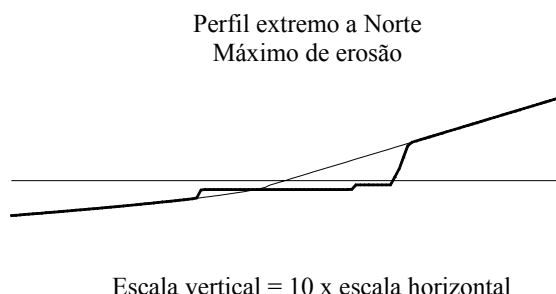


Figura 5.36: Perfil transversal da secção do extremo Norte, admitindo a sobreposição dos efeitos de marés astronómicas, marés meteorológicas e subida generalizada do nível médio da água do mar.

Assim, como foi referido quando se avaliou o comportamento das diferentes inclinações a adoptar na evolução dos perfis transversais, para minimizar o efeito de irregularidades pode adoptar-se inclinações imersas variáveis em função do perfil de equilíbrio, resultando perfis mais suaves e linhas de costa sem “vértices”.

As zonas em acreção são pouco sensíveis à variação do nível da água do mar, registando avanços da linha de costa com variações entre os exemplos na ordem dos 5% na secção extrema a Sul. As zonas em erosão apresentam uma sensibilidade elevada à variação do nível do mar, principalmente nas situações em que é considerada a maré astronómica. Nestes testes, em função das taxas de variação da posição da linha de costa registadas, o efeito da subida do nível do mar é desprezável nos resultados.

## 12. Avaliação da importância da agitação incidente

Tal como na avaliação do efeito das marés, para variações nas características da agitação incidente há variações nas profundidades de fecho e perfis activos em cada instante do cálculo. Assim, a evolução dos perfis transversais no tempo depende largamente das inclinações imersas impostas para a sua evolução, originando irregularidades na configuração em planta da linha de costa.

A figura 5.37 representa a sensibilidade da posição da linha de costa às variações da altura de onda e da direcção de proveniência das ondas. O efeito da variação aleatória da direcção de proveniência das ondas não altera significativamente os resultados da configuração da linha de costa ao final de

dez anos de cálculo. Existe uma relação de proporcionalidade entre a direcção da agitação e a capacidade de transporte sedimentar por aplicação da fórmula CERC, o que em termos médios justifica a semelhança dos resultados.

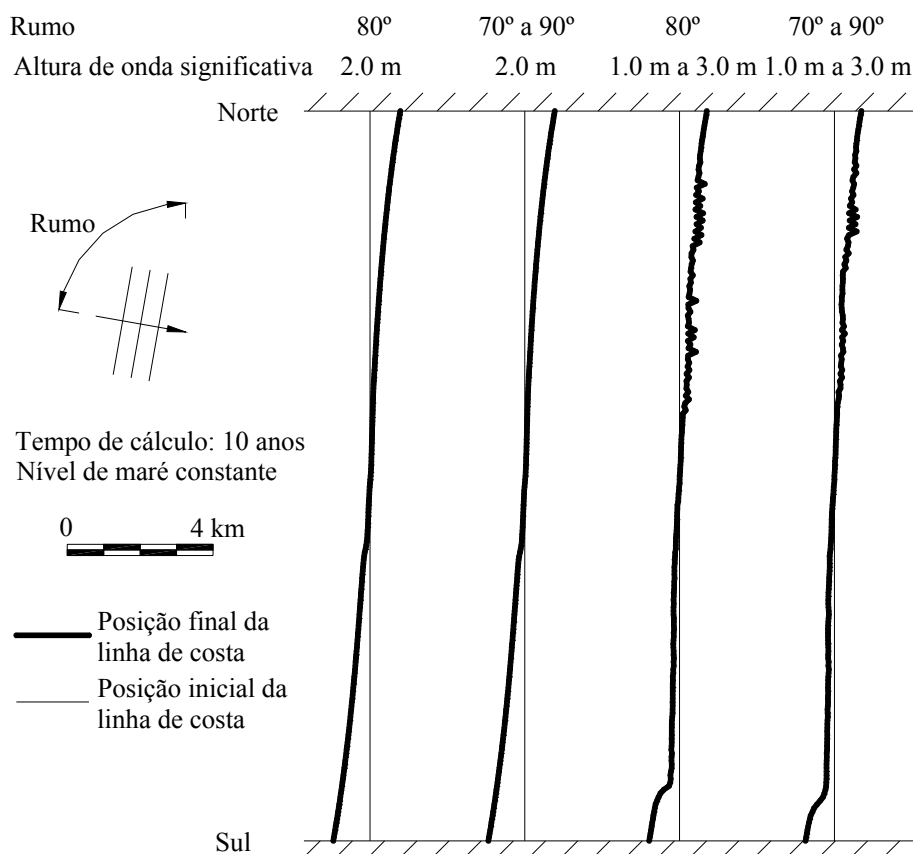


Figura 5.37: Configuração em planta da linha de costa, em função de diferentes considerações de agitação incidente.

A capacidade de transporte sedimentar relaciona-se com a altura de ondas de forma exponencial, agravando o efeito das ondas mais altas. A variação da altura de onda origina diferenças importantes nos resultados, mesmo que a média de alturas de onda adoptadas seja semelhante.

#### 5.3.4 Dúvidas e Lacunas

Como se verificou, os testes desenvolvidos tentam esclarecer algumas das questões colocadas na secção 5.1.7 deste capítulo. No entanto, com a análise dos exemplos apresentados, outras questões são levantadas e às quais não é ainda possível dar uma resposta. A validação de respostas pode ser conseguida com a análise de resultados reais. No entanto, porque dados de campo são escassos e



difíceis de obter e porque as evoluções reais são complexas e associadas a diversos factores físicos, há necessidade de resultados físicos experimentais, fundamentais na calibração e verificação do comportamento do modelo. Por isso, apresentam-se alguns dos potenciais estudos a desenvolver em laboratório para validação do modelo numérico.

No programa computacional, o transporte transversal não é simulado. O programa faz uma distribuição uniforme das variações de volumes em cada perfil transversal activo. Por necessidade de controlo da forma do perfil, são presentemente admitidas limitações que permitem controlar alguns dos parâmetros de evolução dos perfis. Interessa avaliar o comportamento dos perfis transversais em situação de acreção e erosão (por exemplo, a barlamar e a sotamar de esporões). Assim, há necessidade de estudar qual a forma dos perfis transversais quando evoluem no tempo em situação de défice ou ganho sedimentar.

A caracterização granulométrica das areias das praias pode condicionar as formas dos perfis transversais, com previsíveis consequências na configuração em planta. É importante aprofundar quais os parâmetros granulométricos das areias que melhor caracterizam o comportamento das praias (areia em suspensão, areia da zona de rebentação, da zona entre marés ou de todo o perfil activo, etc.). A distribuição granulométrica nos perfis transversais e o comportamento de praias para diferentes curvas granulométricas são portanto, questões a estudar.

A profundidade activa é caracterizada por um valor único para toda a costa. Por definição, a profundidade activa relaciona-se com o conjunto de ondas cuja altura apenas é excedida 12 h por ano. Será necessário avaliar se esta definição de perfil activo aplicada para cada onda tem validade. Importa saber até que profundidade do perfil transversal existem alterações de cotas para cada altura de onda e se essa profundidade é independente da forma do perfil transversal.

Na escala temporal de anos ou décadas a profundidade de fecho integra um processo interactivo relacionado com a redistribuição dos sedimentos no perfil transversal, com a dinâmica natural da barra submersa e a translação do perfil devido aos gradientes de transporte longitudinal (Hanson *et al.*, 1999). Ainda segundo Hanson *et al.* (1999), a previsão da profundidade de fecho falha em regiões onde existe rápida acreção devida a gradientes no transporte longitudinal.

É importante quantificar a capacidade de transporte sedimentar para diferentes climas de agitação. Será conveniente comparar o comportamento das diferentes expressões de determinação de volumes de transporte (CERC, Kamphuis), para diferentes rumos de ondulação, diferentes alturas e

frequências das ondas incidentes. A altura e frequência das ondas incidentes caracterizam a energia da acção sobre a linha de costa, pelo que é conveniente avaliar qual o significado dessas variações na configuração da costa. A energia da agitação marítima tem influência na velocidade com que as mudanças de configuração têm lugar, no entanto, a configuração final de equilíbrio terá alguma probabilidade de ser semelhante. A generalidade dos modelos actuais nada indica quanto a esta questão.

A inclinação da praia é um parâmetro que intervém em muitos aspectos da avaliação do transporte sedimentar e por isso merece também algum estudo. As praias apresentam perfis transversais com várias inclinações. A previsão de inclinações da praia e sua relação com o clima de agitação e granulometria das areias é importante.

A distribuição transversal dos sedimentos em transporte é admitida constante, mas este facto traduz uma simplificação da realidade. A forma de rebentação das ondas influencia a distribuição transversal do transporte, geralmente com maiores volumes de transporte de sedimentos na zona da rebentação.

Como se verifica, são ainda muito relevantes as insuficiências quanto a conceitos relacionados com as configurações da linha de costa. Pelo carácter aleatório de muitos dos factores envolvidos, não é possível atingir uma linha final como previsão, mas possivelmente uma faixa provável para a sua localização. Devido a este facto, interessa principalmente a caracterização com rigor dos factores que se considerarem fundamentais no fenómeno da evolução da linha de costa. A projecção de cenários em função de configurações extremas de todas as alternativas estudadas pode ser uma solução para os problemas.

#### **5.4 Comparação Entre Modelos**

Para efeitos de aplicação a casos reais e no mercado aberto a consultores, existem modelos que pretendem simular a evolução da linha de costa. O desenvolvimento do modelo apresentado nesta dissertação visou a criação de mais uma ferramenta de análise, em que as capacidades e limitações de simulação são bem conhecidas. Este modelo poderá continuar a ser desenvolvido, aperfeiçoando aspectos que se consideram de maior importância. Os critérios de base da programação são semelhantes aos modelos já descritos nas secções 5.2.1 e 5.2.2.

Entre esses modelos e o modelo desenvolvido nesta dissertação, realça-se a tentativa de introduzir o efeito das marés, já que se admite que o mesmo clima de agitação tem consequências distintas caso exista ou não amplitude significativa de marés. Apesar de não se pretender avaliar as configurações da linha de costa sob o efeito de curto prazo, por vezes situações temporárias extremas podem ter consequências importantes a longo prazo. Os efeitos dos temporais são mais gravosos durante os intervalos de tempo que incluem a preia-mar. A refração e a rebentação das ondas podem apresentar variações importantes ao longo do ciclo da maré. O mesmo se pode afirmar em relação à evolução do perfil das praias e em relação à transposição de sedimentos em torno de esporões e quebramares.

A topografia nas zonas terrestres adjacentes à costa é outro aspecto fundamental deste modelo, já que zonas costeiras morfologicamente semelhantes e em erosão, serão mais vulneráveis no caso de terem zonas adjacentes a cotas baixas (planícies aluvionares de baixa altitude), quando comparadas com zonas de cotas altas (campos dunares, zonas com relevo).

Nos quadros seguintes apresentam-se resumidos os principais aspectos e considerações de cada modelo, baseados nas indicações de Hanson e Kraus (1989 e 1991) e de Vicente e Clímaco (2003).

#### GENESIS

Potencialidades	Limitações
Modelação simples da evolução transversal dos perfis em erosão ou acreção, ao admitir que o perfil activo mantém sempre a mesma forma;	Não traduz as diferenças topográficas que possam existir para além dos limites do perfil activo;
Número quase ilimitado de esporões (podendo ser considerado o faseamento na construção), incluindo esporões de forma composta (T, Y, etc.), quebramares, quebramares destacados, revestimentos longitudinais, alimentações artificiais e dragagens;	Ligeiras condicionantes na posição, forma e orientação das estruturas;
Introdução de ondas ao largo, com diferentes alturas, períodos e direcções. Múltiplos trens de ondas, simulando proveniências independentes;	Não estabelece relação directa com a variação do nível de maré, que apenas pode ser representada por variações nos dados de ondas;
Difracção devida a esporões, quebramares ou quebramares destacados;	Não inclui a reflexão das ondas em estruturas;

Transposição de areia em torno dos esporões ou permeabilidade através deles;	Não admite o desenvolvimento de tómbolos, já que a linha de costa não pode alcançar quebramares destacados. A permeabilidade dos esporões é de difícil quantificação;
--	---

## LITMOD

Potencialidades	Limitações
Modelação simples da evolução transversal dos perfis em erosão ou acreção, ao admitir que o perfil activo mantém sempre a mesma forma;	Não traduz as diferenças topográficas que possam existir para além dos limites do perfil activo;
Número quase ilimitado de esporões (com faseamento na construção), quebramares, quebramares destacados, revestimentos longitudinais, alimentações artificiais, fontes aluvionares pontuais e falésias erodíveis;	Não são indicados condicionantes nas formas ou posição destas estruturas!;
Possibilidade de definição da forma do perfil transversal através de pares de pontos coordenados;	Permanência da forma do perfil transversal ao longo da evolução;
Definição de numerosos regimes locais de ondas ao longo de uma batimetria de aproximação e transformação desses dados para valores na rebentação. Pode utilizar dados de agitação marítima sob a forma de séries cronológicas;	Necessidade de proceder à transformação dos dados de onda ao largo para dados na batimetria de aproximação, recorrendo a um modelo matemático bidimensional de propagação de ondas. Não estabelece relação com os níveis de maré;
Versatilidade de condições nas fronteiras da área modelada, constituída por valores ou expressões de cálculo dos caudais sólidos;	Necessidade de conhecer as características reais, usualmente de difícil quantificação;
Transposição de areia em torno dos esporões ou permeabilidade através deles;	A permeabilidade dos esporões é de difícil quantificação;

## LTC

Potencialidades	Limitações
Tradução das diferenças de evolução para além dos limites do perfil activo, em função de diferentes características topográficas;	Limitações inerentes ao actual conhecimento da forma de evolução dos perfis transversais em condições persistentes de erosão ou acreção;
Perfil activo dependente de cada onda, pelo que a	Distribuição transversal do transporte longitudinal

distribuição transversal do transporte ao longo de um período de tempo significativo reflecte as ocorrências de altura de onda;	é admitida constante ao longo de todo o perfil activo de cada onda, independentemente do tipo de rebentação da onda;
Número quase ilimitado de esporões, quebramares, revestimentos longitudinais, alimentações artificiais e fontes aluvionares pontuais;	A posição e forma das intervenções estão condicionadas pela grelha de pontos definida;
Introdução de ondas ao largo, com diferentes modalidades de alturas, períodos e direcções. Possibilidade de variação dos níveis de água por efeito da maré ou subida do nível do mar;	Não inclui o efeito das correntes originadas pelas marés, no transporte sólido;
Difracção das ondas devido a esporões e quebramares;	Tratamento muito simplificado da difracção. Não inclusão da reflexão em estruturas;
Transposição de areias em torno de esporões e quebramares;	Limitações inerentes ao actual conhecimento do fenómeno de transposição de areias em esporões;
Versatilidade de condições nas fronteiras da área modelada, constituída por valores ou extrapolação dos caudais sólidos;	Necessidade de conhecer as características reais, usualmente de difícil quantificação;

Existem também no mercado aberto a consultores alguns modelos de transporte de sedimentos não coesivos que adoptam expressões análogas às expostas na secção 4.2. Algumas características dos principais modelos comerciais que simulam o transporte de sedimentos não coesivos são expressas no quadro seguinte, demonstrando a variedade de formulações e opções, traduzindo diferenças no resultado de aplicações (adaptado de Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Modelos de transporte de sedimentos não coesivos	
MIKE21-ST	Desenvolvido pelo DHI, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas com precisão de segunda ordem. Recorre a outros módulos do MIKE21 para caracterização das tensões de corte, profundidades, correntes e características da ondulação. Utiliza a fórmula de Bijker para o transporte total, ou então um modelo determinístico.
SANDFLOW	Desenvolvido pelo HR Wallingford, utiliza um esquema numérico de diferenças finitas com precisão de primeira ordem. Recorre ao modelo TELEMAC-2D para caracterização de tensões de corte, profundidades e correntes. Utiliza as fórmulas de transporte de Ackers-White, Rijn ou uma lei potencial.

SEDTRAN	Apresentado pela Hidromod. Recorre ao modelo MOHID para caracterização das tensões de corte, profundidades e correntes. Utiliza as fórmulas de Rijn (transporte junto ao fundo), de Bhattacharya-TOW (transporte em suspensão) e de Ackers-White (transporte fluvial).
---------	--

Conciliando os modelos de transporte de sedimentos com os modelos que simulam os fenómenos que ocorrem durante a propagação das ondas, conseguem-se sistemas de modelos integrados. As diferentes propostas de modelos integrados, aplicados à barra do Douro, apresentadas em Veloso-Gomes *et al.* (2000) tinham o mesmo objectivo final e representam algumas afinidades na filosofia de base, mas significativas diferenças de pormenor, nomeadamente na interacção entre os diversos modelos. Salienta-se que a questão da evolução fisiográfica a Sul da barra do Douro, em resultado de intervenções na mesma, constituía uma das preocupações fundamentais a nível do concurso e da opinião pública. A título de exemplo expõem-se alguns sistemas de modelos integrados, aplicados nas referidas propostas para o estudo do transporte de sedimentos, cheias fluviais e agitação.

O primeiro modelo integrado que se apresenta refere-se à série de módulos MIKE21. Foram utilizados os módulos MIKE21-PMS para caracterização da altura de onda, direcção das ondas e tensões de radiação, os módulos MIKE21-HD e MIKE11-HD para obtenção de correntes, níveis de superfície livre e tensões de corte, com retorno ao módulo MIKE21-HD a cada passo de cálculo (1 s a 10 s) e o módulo MIKE21-ST para a obtenção da taxa de transporte anual e taxas de deposição/acrecção. Procedeu-se ao retorno ao MIKE21-PMS a cada hora de cálculo, com actualização do nível de maré (Veloso-Gomes *et al.*, 2000).

Estrutura do sistema de modelos:

MIKE21-PMS, com dados de ondulação a barlamar, batimetria e níveis de maré. Resultados: alturas de onda, direcção das ondas e tensões de radiação;

MIKE21-HD e MIKE11-HD, com dados de batimetria, caudal fluvial, maré e tensões de radiação. Resultados: correntes, níveis de superfície livre e tensões de corte. Retorno ao MIKE21-HD a cada passo (1 s a 10 s);

Retorno ao MIKE21-PMS a cada hora de cálculo, com actualização do nível de maré. A presença de correntes não influencia a agitação;

MIKE21-ST, com dados de batimetria, granulometria, nível da superfície livre, correntes e tensões de corte e a resultar uma taxa de transporte anual e taxas de deposição/acrecção

anuais. Não modifica a batimetria;

Note-se que a agitação não é influenciada pela existência de correntes e o transporte de sedimentos não altera a batimetria.

Tempo de simulação:

Dois ciclos de maré de 13 h cada, num total de 26 h. Só o segundo ciclo é utilizado para os cálculos de transporte de sedimentos. Os resultados de cada simulação são ponderados para efeitos de cálculo das taxas de transporte anuais.

Condições fronteira:

Cinco situações de agitação marítima combinadas e ponderadas de forma a representar os efeitos integrados ao longo de um ano de transporte de sedimentos;

Caudal fluvial constante;

Foi considerada uma maré de águas médias (nível médio a 2.08 m ZH);

Granulometria com  $d_{50} = 0.9$  mm.

Calibração:

Apenas a componente hidrodinâmica foi calibrada.

O sistema de modelos TELEMAC foi utilizado no segundo caso que se apresenta. Note-se que neste estudo não foi considerado o efeito das ondas e também não consideraram a dimensão dos sedimentos.

Estrutura do sistema de modelos:

TELEMAC-2D, com dados de batimetria, caudal fluvial e maré. Resultados: correntes e níveis de superfície;

Retorno a TELEMAC-2D a cada passo de cálculo;

Note-se que não foi estudada qualquer interacção da agitação com as correntes e não foi feito qualquer estudo hidromorfológico.

Tempo de simulação:

Dois ciclos de maré, sendo apresentados apenas os resultados do segundo ciclo.

Condições fronteira:

Não foram utilizadas ondas;

Caudais fluviais distintos de Verão e de Inverno;

Uma maré de águas vivas;
Não foi considerada qualquer granulometria.
Calibração:
Sem qualquer calibração.

O recurso a vários modelos independentes é apresentado no terceiro caso de modelação integrada.

Estrutura do sistema de modelos:
SWAN, com dados de ondulação a barlamar, batimetria e níveis da maré. Resultados: altura da onda, direcção das ondas e tensões de radiação;
TELEMAC-2D, com dados de batimetria, caudal fluvial, maré e tensões de radiação (valores interpolados a partir dos resultados do SWAN). Resultados: correntes, níveis de superfície livre e tensões de corte. Retorno a TELEMAC-2D a cada passo de cálculo;
SANDFLOW, com dados de batimetria, granulometria, nível da superfície livre, correntes, velocidades orbitais e tensões de corte. Resultados: fluxo residual de sedimentos integrado num ciclo de maré e padrões de erosão/acrecção potenciais;
Note-se que a agitação não foi considerada como sendo influenciada pelas correntes e foi admitido que o transporte de sedimentos não alterava a batimetria.
Tempo de simulação:
Dois ciclos de maré, num total de 24.5 h.
Condições fronteira:
Três situações de agitação marítima representando situações de Verão, Inverno e cheia usual, simuladas para cinco níveis de maré;
Caudais fluviais representativos das situações de Verão, de Inverno e de cheia usual;
Uma maré de águas vivas;
Granulometria com $d_{50} = 0.4$ mm.
Calibração:
Apenas a componente hidrodinâmica foi calibrada.

O quarto caso também recorre à utilização de vários modelos, apresentando uma interacção entre onda, corrente e transporte de sedimentos. Foi apresentada uma diferença significativa de resultados nas taxas de transporte médias para um cálculo baseado em 24 h ou em 25 h.



**Estrutura do sistema de modelos:**

MOHID, com dados de batimetria, caudal fluvial e maré. Resultados: correntes, níveis de superfície livre e tensões de corte;

REFDIF, com dados de ondulação a barlar, batimetria, níveis de superfície livre e correntes. Resultados: altura de onda, direcção das ondas e tensões de radiação;

SEDTRAN, com dados de batimetria, granulometria, correntes e tensões de corte. Resultados: taxas de transporte e actualização da batimetria;

Retorno ao MOHID a cada passo do cálculo, retorno ao SEDTRAN a cada dez minutos do cálculo com actualização de dados e retorno ao REDDIF a cada duas horas de cálculo com actualização de dados. O modelo apresenta uma interacção completa entre onda-corrente-transporte de sedimentos.

**Tempo de simulação:**

Dois ciclos de maré, num total de 25 h.

**Condições fronteira:**

Duas situações de agitação marítima, uma típica de Verão e outra típica de Inverno;

Caudais fluviais representativos de três situações típicas: Verão, Inverno e cheia habitual;

Maré de águas vivas para as situações de Verão e de Inverno e a situação de cheia habitual com uma maré intermédia;

Granulometria com  $d = 0.5$  mm e 0.3 mm no interior do estuário. Indicação de diâmetros significativos e não de diâmetros médios.

**Calibração:**

Apenas a componente hidrodinâmica foi calibrada.

A última estrutura de modelos apresentada corresponde à utilização dos diversos módulos MEGA.

**Estrutura do sistema de modelos:**

MEGA-Ondas, com dados de ondulação a barlar, batimetria, preia-mar, baixa-mar e nível médio da maré. Resultados: altura da onda, direcção das ondas e tensões de radiação;

MEGA-Marés-2D, com dados de batimetria, caudal fluvial, maré e tensões de radiação interpoladas. Resultados: correntes, níveis de superfície livre e tensões de corte. Retorno a MEGA-Marés-2D a cada passo de cálculo;

MEGA-Transporte de Areias, com dados de batimetria, granulometria, nível da superfície livre, correntes e tensões de corte. Resultados: taxa de transporte anual e taxas de deposição/acrecção anuais;

Note-se que foi admitido que a agitação não era influenciada pelas correntes e só foi calculada para o nível médio e que o transporte de sedimentos não alterava a batimetria.

Tempo de simulação:

Dois ciclos de maré, num total de 25 h.

Condições fronteira:

Sete situações de agitação marítima que combinadas de forma ponderada com os caudais fluviais, representam em termos de transporte, os efeitos integrados ao longo de um ano;

Caudais fluviais representativos das situações de Verão, de Inverno e de uma situação média;

Uma maré de águas médias;

Granulometria com  $d_{50} = 0.3$  mm.

Calibração:

Foram calibradas a componente hidrodinâmica e morfológica e efectuada uma análise de sensibilidade à granulometria dos sedimentos.

Na análise das diversas propostas apresentadas realça-se a grande diversidade de diâmetros médios considerados. O tempo de cálculo optado correspondeu em geral a dois ciclos de maré, variando entre as 24.5 h e as 26 h. Foi com base nestes tempos de cálculo que foram estimadas as taxas de transporte sedimentar. As considerações relativas à agitação marítima e às amplitudes de maré também representam opções bastante diversas, com cenários de altura de onda desde 1 m a 2 m de altura até ondas de 7 m de altura e amplitudes de maré desde menos de 2 m até quase 3.5 m.

A referência apresentada corresponde a um estudo internacional recente, representando a forma de conhecimento actual. Possibilita a percepção da grande disparidade de opções de modelação e da incerteza de valores a utilizar, confirmando a necessidade de continuar a investigação do comportamento dos fenómenos costeiros, aumentando as capacidades de previsão e de modelação.

## Capítulo 6

### APLICAÇÕES À FAIXA COSTEIRA DA RIA DE AVEIRO

Eu ontem passei o dia  
Ouvindo o que o mar dizia.

*António Botto*



## **6 APLICAÇÕES À FAIXA COSTEIRA DA RIA DE AVEIRO**

O mais dinâmico tipo de costas é o de baixas cotas de areia, desenvolvidas ao longo de deltas, ou línguas de areia. A paisagem da costa é um constante evoluir do balanço dinâmico entre as fontes sedimentares, a energia das ondas e o nível do mar (WCU, 2003).

A região do sistema lagunar a Sul da barra de Aveiro, na costa ocidental portuguesa, é a principal área analisada neste capítulo. Pela fragilidade que apresenta, esta é das zonas com necessidade urgente de estudo. Para avaliar o comportamento dos conceitos e modelos apresentados, procedeu-se a aplicações em situações concretas, realçando dificuldades e problemas de quantificação, conduzindo por vezes a análises do tipo qualitativo ou comparativo.

A aplicação na costa portuguesa dos numerosos conceitos costeiros referidos ao longo deste trabalho é reduzida. Desta forma, os exemplos que se apresentam de seguida, representam um contributo no enquadramento de grandezas e valores apropriados ao litoral costeiro do Noroeste português e em especial da região de Aveiro. O que se pretende analisar são essencialmente os meios que permitem melhorar a previsão da evolução da linha de costa, de maneira a que os instrumentos de planeamento do território tenham bases científicas cada vez mais sólidas que justifiquem opções de ocupação e urbanização.

### **6.1 Referências à Dinâmica Litoral da Região de Aveiro**

Devido à natureza morfodinâmica e sedimentar, a linha de costa na região de Aveiro, tem sofrido grandes variações ao longo dos tempos. Ao proceder a uma análise desta zona costeira é por isso indispensável relacioná-la com o desenvolvimento histórico da laguna de Aveiro.

No enquadramento geológico e geomorfológico da zona costeira entre Espinho e a Serra da Boa Viagem, indica-se que esta corresponde a uma bacia de sedimentação instalada no bordo ocidental do Maciço Hespérico, a qual teve origem no Mesozóico, relacionado com as fases de abertura do oceano Atlântico. Esta bacia foi local de sedimentação intensa por materiais provenientes tanto do Maciço Hespérico, a Este, como de um bloco continental, situado a Oeste, do qual o único vestígio é o arquipélago das Berlengas (Diogo, 2004).

Em termos gerais, nesta faixa costeira podem-se distinguir diversas componentes geomorfológicas, divididas pela planície costeira, praias e corpo lagunar. O trecho litoral é dominado pela laguna de Aveiro, que se desenvolve com traçado linear e orientação NNE-SSE. Para além da Serra da Boa Viagem e da laguna de Aveiro, toda a restante área pode ser considerada como pertencente a uma planície costeira de elevada uniformidade topográfica, que se estende desde Espinho até próximo da Nazaré (Ferreira, 1998). Também Pereira (2000) refere que a faixa continental adjacente ao litoral, situada no subsector Aveiro – Cabo Mondego, corresponde a uma zona aplanada, de baixa altitude e grande uniformidade topográfica, típico das planícies costeiras, caracterizada, na maior parte pela presença de formações arenosas.

O domínio litoral é caracterizado, na maior parte, pela presença de formações arenosas, pertencentes ao Holocénico, sendo essencialmente constituído por extensas praias de areia, limitadas, para o interior, por estruturas dunares, cuja tipologia e morfologia variam de local para local. De acordo com Granja, referido em Diogo (2004), o campo dunar mostra evidências estratigráficas e morfológicas de acumulação de areias durante o Holocénico.

Neste trecho surge também inserida na planície costeira a laguna de Aveiro, que domina a paisagem desde Ovar até Mira. A laguna de Aveiro constitui o sistema lagunar de maior dimensão no território nacional, inserido nos concelhos de Ovar, Estarreja, Murtosa, Aveiro, Ílhavo e Vagos. Este tipo de morfologia está normalmente associado a uma costa onde a deposição de sedimentos é bastante elevada, sendo o caudal dos rios, em geral, elevado e sazonalmente variável, transportando grandes quantidades de sedimentos em períodos de cheias.

A formação da laguna de Aveiro deve-se a um elevado fornecimento de sedimentos continentais e apresenta uma evolução muito dinâmica. O processo de transformação está relacionado com a evolução do cordão litoral, formado através da deposição e acumulação de areias, que dificultou, ao longo dos tempos, a saída das águas do rio Vouga para o mar (figura 6.1). Ao longo de todo o processo de evolução do sistema lagunar, a barra foi ocupando diversas posições. Foi a acção humana que, no século XVIII, interrompeu este processo evolutivo e obrigou à fixação definitiva da barra. Desde aí, o equilíbrio dinâmico tem-se mantido artificialmente, como resultado de constantes intervenções de engenharia na embocadura.

Se na primeira representação cartográfica da costa portuguesa o mar ocupava toda a zona da laguna, essa situação alterou-se e no século XVI já as restingas de areia formavam uma laguna, estando em 1584 a barra três quilómetros a Sul da actual. Em 1598 a Câmara Municipal de Aveiro

tem de mudar a sinalização da barra 3 ou 4 vezes por ano, estando esta a Sul da Costa Nova. Em 1643 a barra atinge a Vagueira e em 1687 dois engenheiros holandeses propõem a abertura da barra em S. Jacinto, mas não há dinheiro para a obra. Em 1756 a barra atinge a costa de Mira. O canal da barra fecha completamente em 1787, levando à ruína do comércio, à insalubridade da população devido à estagnação das águas e consequentemente ao decréscimo da população na região (Rua, 2002).



Figura 6.1: Estádios da formação e evolução da laguna de Aveiro desde o século X (retirado de Diogo, 2004).

A laguna de Aveiro, situada entre Ovar e Mira, apresenta contornos bastante irregulares, com um grande número de canais e esteiros de pequena profundidade e algumas ilhas e ilhotas. O desenvolvimento da laguna processou-se segundo duas direcções, uma paralela à linha de costa, segundo a direcção N-S, compreendendo os canais de Mira e Ovar e, outra, perpendicular à primeira, que se prolonga desde a entrada da barra do porto de Aveiro para o interior. Os quatro canais principais da laguna são o de Ovar, o da Murtosa, o de Vagos e o de Mira, sendo este último adjacente às praias da Vagueira, Costa Nova e Barra.

Os dados cronológicos disponíveis evidenciam que na área costeira de Aveiro se conservam indicadores de recuos (depósitos lagunares e sistemas dunares) e de avanços do mar, de que o actual acontecimento transgressivo não é mais do que a repetição dos que nela ocorreram, mais do que uma vez, num passado recente, como é referido por Granja, em Diogo (2004).

A comparação da linha de costa em dois períodos diferentes e numa extensão de cerca de 14 km a Sul da barra de Aveiro, permite verificar as dificuldades de avaliação de taxas de erosão (figura 6.2). Entre os períodos avaliados (1967 e 1996) realizaram-se obras de defesa costeira que alteraram as condições naturais de evolução da linha de costa. Em determinados locais, registam-se

recuos na ordem dos 280 m, o que equivale a taxas de erosão de cerca de 10 m/ano, valores usualmente referidos para esta região. A figura seguinte mostra a comparação das linhas de costa com base em fotografias aéreas de 1967 e 1996.

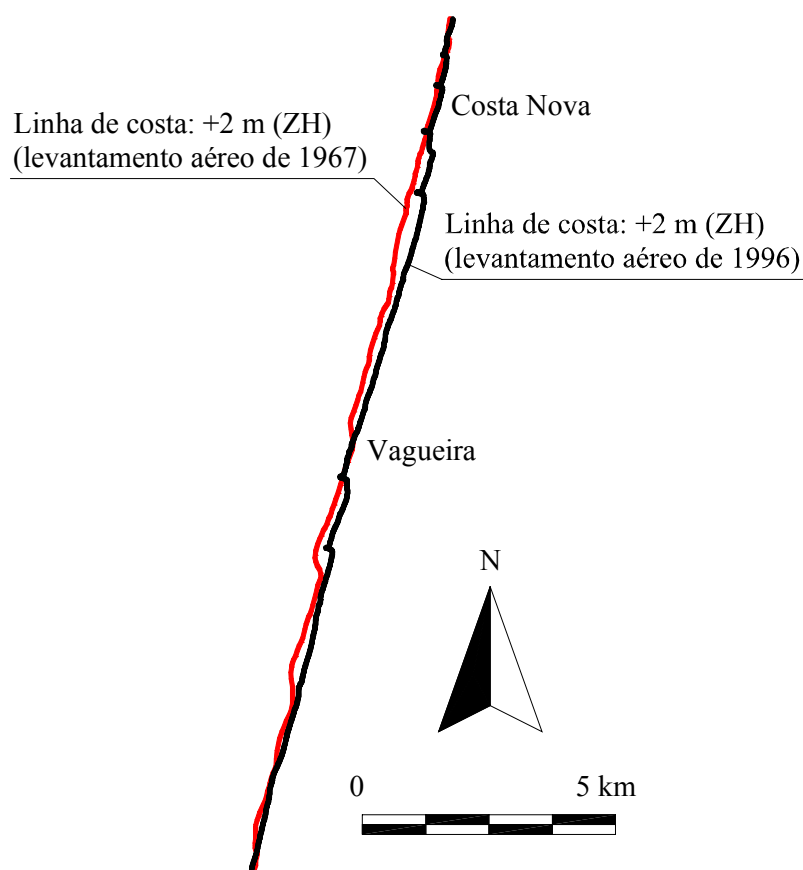


Figura 6.2: Posição da linha de costa, com base em fotografias aéreas de 1967 e 1996, na região a Sul de Aveiro.

Valores indicativos de taxas de migração das praias para o interior podem ser encontrados em Carvalho e Granja (1997), como 1.2 m/ano a 1.6 m/ano para o trecho Aveiro-Quiaios, ou o valor máximo de 3.9 m/ano no intervalo de 1980 a 1990, no trecho Vagueira-Areão e cerca de 2.4 m/ano para a Barra-Costa Nova.

Segundo a CRL (1998), no temporal de 29/30 de Dezembro de 1998 repetiu-se um fenómeno de que já havia notícia. De facto, na parte Norte da praia do Areão, o mar arrasou a duna em grande extensão e provocou galgamentos que inundaram os campos de cultivo e deram origem a escoamento em lâmina para dentro da ria. A estrada que corre ao longo da ria esteve cortada ao tráfego entre a Praia do Labrego e o Areão e foi efectuada uma intervenção de emergência no local.



A evolução de longo prazo será mais do que suficiente para pôr o braço Sul da ria de Aveiro em contacto directo com o mar, ou seja, para que surja uma nova embocadura na ria.

## **6.2 Breve História das Intervenções de Defesa Costeira Efectuadas**

As intervenções que têm vindo a ser efectuadas têm como finalidade resolver ou minimizar alguns dos problemas de erosão e visam defender sobretudo os núcleos urbanos. A cronologia das intervenções permite desde logo constatar que os problemas de erosão na costa são uma realidade antiga.

Devido às características da região de Aveiro, com cotas baixas e sem protecções naturais e com um clima de agitação intenso, não há grandes alternativas de protecção. Em termos futuros, é fundamental a tentativa de mitigação dos impactes de erosão em locais específicos, através da manutenção de determinadas estruturas de defesa já existentes para fixar a actual posição da costa. Essas estruturas serão obrigadas a frequentes trabalhos de manutenção e algumas delas devem até sofrer alterações de forma para adequar a sua função. Conjuntamente com estas medidas deve ser adoptado um plano de monitorização do comportamento das estruturas de forma a baixar os custos de manutenção e aumentar a funcionalidade.

### **6.2.1 Esporões e Obras Aderentes**

Segue-se uma descrição cronológica sumária das principais intervenções efectuadas no litoral entre Espinho (limite Norte da zona costeira da ria de Aveiro) e Mira (limite Sul da ria), com a aplicação de obras aderentes longitudinais à praia e esporões transversais à praia.

#### Espinho

Em 1908 a malha urbana de Espinho está ameaçada, a aldeia de pescadores está debaixo de água e a costa que no passado apresentou uma protuberância de terra está quase linear. No ano seguinte começa a erguer-se uma muralha de pedra para conter o mar. Em 1991, a Norte do que é a cidade actual, há a derrocada da muralha com a força do mar.

Durante os anos seguintes à construção da muralha a cidade continuou a crescer, sem nunca recuperar a terra perdida para o mar e só em 1958 se faz a primeira intervenção com quatro molhes (esporões) em frente do núcleo urbano, mas sem eficácia em termos de protecção. Em 1973 há mais um molhe (esporão), mas a praia está mais estreita e em 1975, com os cinco molhes a situação é dramática e o mar bate directamente na marginal, a Sul da cidade.

Esta situação continua a agravar-se (crise total em 1980, sem areia nenhuma e o mar a chegar à rua) até que em 1984 foi executado o projecto de dois grandes esporões nos limites do núcleo urbano. Quatro anos depois a praia já se havia formado e a situação passou a ser de relativa estabilidade. Em 1996 houve uma intervenção nos esporões (colocação de 500 tetrápodes, reforço das bermas, da superestrutura e dos enrocamentos), mas a praia continua com um tamanho razoável.

A situação actual das obras de defesa no município de Espinho é descrita por Veloso-Gomes e Taveira-Pinto (1999), como três esporões em Espinho e dois em Paramos, sendo ainda composto por obras aderentes em Espinho (400 m) e em Paramos (100 m).

#### Esmoriz-Torreira

A frente litoral de Esmoriz até Cortegaça encontra-se defendida por um campo de quatro esporões construídos entre 1985/86 e 1989 e por uma extensa defesa frontal em enrocamento entre estes esporões. Este sistema de defesa tem exigido frequentes intervenções de manutenção (CRL, 1998).

Em 1959 existia já uma pequena defesa frontal no Furadouro e que veio a ser progressivamente prolongada, unindo hoje o enraizamento dos dois esporões existentes e prolongando-se ainda um pouco para Sul. Em 1972/73 foram construídos três esporões no Furadouro, apesar de actualmente um deles (o mais a Norte) estar soterrado e não ser visível. O esporão mais a Sul foi reconstruído recentemente numa posição mais a Sul do que a inicial (CRL, 1998).

A primeira intervenção de defesa costeira na Torreira data de 1974 e consistiu na construção de uma pequena defesa frontal em enrocamento. Em 1980/81 foi construído um esporão (CRL, 1998).

Barra-Mira

No projecto da Direcção Geral de Portos (HP, 1981b), são referidas algumas das obras de defesa executadas anteriormente a Junho de 1981. Assim, por ordem cronológica indicam-se as principais construções.



Figura 6.3: Localização dos esporões e obras aderentes, respectivamente, na região da Costa Nova e da Vagueira (retirado do EUrosion, 2003).

Em 1972/73 foi construído o campo de esporões da Costa Nova, constituído por onze esporões e obras de defesa aderente entre os esporões, formando 2400 m de frente litoral protegida. Hoje, o sistema de defesa é composto por cinco esporões, mais afastados entre si e de maior dimensão do

que os esporões iniciais, que são complementados por uma defesa frontal na zona da Costa Nova, como é visível na imagem da esquerda da figura 6.3 (CRL, 1998).

De 1975 a 1978 foi construída uma defesa frontal imediatamente a Sul do molhe Sul da barra, com cerca de 800 m de extensão.

Em 1978 foram executadas as primeiras obras de defesa da Vagueira, do tipo defesa frontal aderente com enrocamento. Com o agravamento do processo erosivo, viriam a ser construídos posteriormente dois esporões. Durante 1979/80 foram construídos a Sul do campo de esporões da Costa Nova e imediatamente a Sul da povoação da Vagueira, dois esporões, cada um com cerca de 250 m de comprimento (lado direito da figura 6.3). O plano de obras do projecto atrás referido previa a construção de dois novos esporões entre os agora indicados.

A Sul do esporão da Vagueira e até à Praia de Mira estavam também projectados mais sete esporões, todos eles com 250 m de extensão e espaçados cerca de 2000 m, mas não foram concretizados. Só em 2003, e de acordo com o preconizado no Plano de Ordenamento da Orla Costeira (POOC, 1998), foram construídos os esporões do Areão e de Poço da Cruz, a Sul da Vagueira.

Estão construídos dois esporões a Sul da Praia de Mira que não provocam descontinuidade de assinalar na linha de costa. Contudo, foram identificados alguns problemas na frente urbana. O muro que contém a marginal é solicitado pelas ondas em situação de temporal. Na parte Sul, junto ao campo de futebol foram instalados recentemente passadiços sobrelevados de acesso à praia.

### **6.2.2 Alimentação Artificial das Praias e Zonas Submersas Próximas com Areias Provenientes das Dragagens**

Os dragados das operações de manutenção dos canais de acesso a portos podem e devem ser integrados nas intervenções de defesa costeira.

Não existem registos de alimentações artificiais das praias da região de Aveiro. Os volumes dragados no porto de Aveiro não têm sido colocados nas praias, constituindo um factor de agravamento do desequilíbrio do sistema. No entanto, no PROT.CL (Plano Regional de

Ordenamento do Território do Centro Litoral) apontou-se veementemente para a alimentação artificial, a qual não teve concretização.

Em termos mais gerais, a alimentação artificial das praias iniciou-se em Portugal nos anos 50 (recarga artificial da praia do Estoril). No início da década de 70 foi efectuada a primeira campanha de grande vulto com a alimentação da praia da Rocha a partir de sedimentos dragados no estuário do rio Arade. Nas décadas de 80 e 90 foram realizadas diversas operações de alimentação artificial de praias portuguesas (Paixão, 1998).

### **6.2.3 Restabelecimento Artificial do Transporte Aluvionar aos Quebramares**

Aproveitando a acumulação das areias a Norte do quebramar norte da barra de Aveiro, durante algumas dezenas de anos e até 1999 (?), foram extraídas grandes quantidades de areias de S. Jacinto, as quais foram exclusivamente utilizadas na construção civil, representando um défice sedimentar no sistema costeiro.

Desde a década de 60 que se apresenta a possibilidade de minorar os efeitos da retenção de areias a Norte da barra de Aveiro pela transposição artificial de areias para sotamar. Oliveira (1968) efectuou um estudo da viabilidade desta solução e desde essa data, apesar de não ter sido abandonada a ideia, nunca foi tomada uma decisão em concreto.

### **6.2.4 Outras Intervenções**

As ripagens de areias para execução de dunas artificiais, os meios de defesa passivos (paliçadas), que permitem alguma retenção da areia transportada por via eólica e o controlo de acessibilidades, estacionamento rodoviário e acessos pedonais à praia, com consequente preservação das dunas naturais têm sido outras intervenções desenvolvidas e a registar resultados.

Desde o final da década de 90 e até ao presente, têm sido realizadas diversas intervenções de emergência no litoral Noroeste português, nomeadamente na restinga Sul da ria de Aveiro.

### **6.3 Balanço Sedimentar em Células Costeiras**

No estudo dos problemas costeiros, a abordagem por balanço nas células sedimentares continua a ser utilizada. Segundo Komar (1976), as maiores entradas numa célula sedimentar devem-se ao transporte longitudinal de barlamar, às fontes aluvionares fluviais e à erosão costeira, enquanto as maiores saídas se devem ao transporte longitudinal para sotamar, transporte para o largo (especialmente através de fossas submarinas) e ao transporte eólico, formando as dunas.

Se não houver troca de sedimentos de uma célula sedimentar com as células adjacentes, esta é considerada fechada ao transporte longitudinal e o balanço sedimentar torna-se mais fácil de aplicar. Uma célula típica caracteriza-se por um promontório ou trecho rochoso com reduzida fonte de sedimentos a barlamar e uma fossa submarina a sotamar (absorvendo a areia e conduzindo-a para grandes profundidades), ou um promontório ou trecho rochoso com capacidade de retenção.

As estimativas das taxas de transporte sólido longitudinal devem ter por base preferencial o conhecimento de valores em regiões próximas, o cálculo a partir da caracterização da evolução volumétrica do litoral ao longo dos anos, associando a noção de balanço sedimentar e o cálculo a partir do conhecimento do clima de agitação e dos caudais sólidos associados às diferentes ondas.

#### **6.3.1 Valores de Transporte Sedimentar**

Nos estudos de transporte sedimentar podem ser definidas células que dividem a extensão da costa em trechos onde se admite que não há troca significativa de sedimentos para os trechos adjacentes. A análise dos valores de transporte sedimentar existentes, e a comparação crítica desses mesmos valores deve ser uma via de comprovação e validação de alguns dos resultados dos modelos de transporte. No entanto, o conhecimento de valores válidos mostra-se escasso e muito disperso.

Nesta secção são apresentados alguns valores que tentam caracterizar os volumes sedimentares em transporte na costa Noroeste de Portugal, entre o rio Douro e o Cabo Mondego. Seria fundamental para a área em estudo, e para muitas outras, a determinação do valor total do volume de sedimentos resultante do transporte longitudinal, afim de prever a quantidade de sedimentos disponíveis para a alimentação das praias e das dunas, uma vez que a deriva litoral é a principal responsável pelo

transporte de sedimentos na costa ocidental portuguesa. No entanto, existem poucos dados, uma vez que são quase inexistentes as medições deste transporte (Diogo, 2004).

No final da década de 60, Oliveira (1968), já tinha efectuado um estudo com alguma profundidade das capacidades de transporte sólido longitudinal, no âmbito de um projecto de restabelecimento artificial do transporte de areias através da embocadura da ria de Aveiro. Este trabalho expressa algumas das dificuldades de avaliação da capacidade de transporte sedimentar que se continuam a sentir, pelo que é referido com algum pormenor. No quadro seguinte resumem-se os resultados obtidos pelas diferentes vias utilizadas, onde os valores positivos se consideram dirigidos de Norte para Sul.

Tabela 6.1: Volumes de areias litorais movimentadas em ano médio (Oliveira, 1968).

Clima de agitação adoptado	Fórmula	Volumes ( $\times 10^3 \text{ m}^3$ )	
		Totais	Saldo
1) Observações da Figueira da Foz: mensal, elaborado pela Hidrotécnica Portuguesa	CERC	5600	0
2) Observações da Figueira da Foz: anual, tradução numérica do "sólido" de densidades de ocorrências que figura na Memória n.º 290 do L.N.E.C.	CERC	11500	+ 3500
3) Atlas Oceanográfico do USNHO	CERC	8000	+ 1000
4) Atlas Oceanográfico do USNHO	Bonnefille	7800	+ 2600
5) Atlas Oceanográfico do USNHO	Castanho	5800	- 400

Oliveira (1968) refere que a flagrante disparidade dos resultados, embora provoque uma certa desorientação, é aceitável, pois de facto, ela é normal e traduz apenas o elevado grau de incerteza inerente a todas as soluções até à data encontradas para o problema da avaliação do transporte sólido sob a acção da onda. Em face desta disparidade, a adopção dum valor digno de crédito revela-se extremamente difícil e teria muito de aleatório, se não se dispusesse dos resultados obtidos por outras vias. Existe a certeza de um importante saldo anual de Norte para Sul, o que bastaria para eliminar os resultados 1) e 5), e um conhecimento razoável, da sua ordem de grandeza, permitindo ponderar a maior ou menor validade dos resultados 2), 3) e 4).

Se houvesse algum fundamento para adoptar a média dos resultados obtidos, fixar-se-ia o saldo anual médio em  $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$  dirigido de Norte para Sul, e o volume total movimentado em  $7.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ , valores que se consideram aceitáveis. Tal critério, porém, só seria de admitir se todas

as vias utilizadas merecessem em princípio o mesmo crédito, o que não parece ser o caso (Oliveira, 1968).

De facto, quanto aos resultados obtidos pelas vias 1) e 2) são postas reservas quanto à validade dos climas de agitação marítima nelas utilizados. Considerando em separado o saldo anual obtido em 1), pode afirmar-se, sem margem para dúvida, que está errado, provavelmente em razão da incorrecta distribuição por rumos atribuída ao clima de agitação mensal, elaborado pela Hidrotécnica Portuguesa a partir das observações realizadas na Figueira da Foz. Relativamente ao saldo anual obtido em 2), apenas se pode dizer que parece manifestamente exagerado, devendo a explicação residir na duração excessiva atribuída aos escalões de altura de onda de amplitudes superiores a 6.0 m, que, só por si, determinam um saldo anual de Norte para Sul de  $2.8 \times 10^6 \text{ m}^3$  (Oliveira, 1968).

Dos resultados 1) e 2) pode concluir-se a importância fundamental que tem a correcta caracterização do clima de agitação marítima válida na zona em estudo. Qualquer anomalia das distribuições das alturas e dos rumos ao largo, das ondas de elevada capacidade de transporte (grandes alturas e acentuadas obliquidades na rebentação), pode afectar gravemente a validade dos resultados. O clima obtido do Atlas Oceanográfico americano, que conduziu aos resultados 3), 4) e 5), merece também reservas, quer pelo pequeno número de observações em que se apoia, quer por não respeitar directamente à faixa litoral de Aveiro mas sim a uma zona marítima extensa, quer ainda por esquematizar demasiado a distribuição da agitação por alturas, períodos e rumos - apenas três escalões de alturas (alta, média e baixa), dois escalões de períodos (vaga e ondulação) e apenas três escalões de rumos com interesse para a zona costeira em estudo (NW, W e SW). Apesar das suas deficiências, porém, este clima foi considerado mais representativo que os anteriores (Oliveira, 1968).

Admitindo que as fórmulas CERC, de Bonnefille-Pernecker e de Castanho merecem em princípio o mesmo crédito, seria lícito aceitar como válida a média dos valores 3), 4) e 5), com o que se obtinha um saldo anual de Norte para Sul da ordem dos  $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$  e um volume total movimentado da ordem dos  $7.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ , valores que se consideram muito plausíveis (Oliveira, 1968).

Considerando em separado o saldo anual encontrado pela fórmula de Bonnefille-Pernecker, apenas se pode afirmar, em face da cubicagem das areias acumuladas na praia da Figueira da Foz após a construção do molhe Norte, que parece excessivo. A explicação da discrepância poderá residir na



circunstância de a fórmula só ser adequada a costas de batimetria paralela, o que só aproximadamente se verifica na zona de Aveiro. De facto, os autores fazem intervir na expressão do caudal sólido a obliquidade ao largo, nada acrescentando sobre a natureza da batimetria encontrada pela onda na sua progressão até à rebentação. Sabendo-se que esta, para uma mesma onda e uma mesma orientação da linha da praia, poderá determinar capacidades de transporte diversas (Oliveira, 1968).

Relativamente à aplicação da fórmula de Castanho, é evidente o absurdo do resultado obtido através dela. A anomalia do resultado é em grande parte atribuível à forte incidência da ondulação de Sudoeste no conjunto geral dos volumes movimentados. Com efeito, segundo o clima de agitação utilizado, toda a ondulação proveniente de SW nos meses de Janeiro, Fevereiro e Novembro é classificada como alta, o que custa a admitir; além disso, a duração que lhe é atribuída ultrapassa os 9.5 dias em ano médio, o que se considera também excessivo. Bastariam estas duas particularidades, que se consideram incorrecções do clima de agitação do United States Navy Hydrographic Office, aliadas à circunstância de a fórmula de Castanho atribuir a esta onda uma capacidade de transporte superior à determinada por qualquer das outras, para afectar gravemente a validade do resultado obtido, afirmação que melhor se aceita tendo presente o volume de areias de  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  que uma ondulação alta, de SW, com a duração de 9.5 dias, é capaz de transportar de Sul para Norte (Oliveira, 1968).

Quanto ao resultado obtido pela fórmula CERC, parece ser o mais plausível por se situar na ordem de grandeza conhecida a partir das avaliações volumétricas realizadas na praia da Figueira. Independentemente disso, esta fórmula parece merecer maior crédito em razão do elevado número de dados empíricos e semi-empíricos que condensa e da maior divulgação que tem tido (Oliveira, 1968).

Em conclusão, do trabalho de Oliveira (1968) retira-se que se a intensidade dos movimentos litorais tivesse que ser fixada apenas com base nesta tentativa de quantificação, os valores adoptados deveriam ser utilizados com extrema prudência. Na ausência de outras fontes, em face dos resultados obtidos pela fórmula CERC e das médias, quer da totalidade dos resultados, quer dos correspondentes apenas ao clima de agitação do Atlas Oceanográfico do USNHO, ser-se-ia levado a fixar o volume total de aluviões litorais movimentados em ano médio em  $7.0 \times 10^6 \text{ m}^3$  a  $8.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ , com um saldo anual de Norte para Sul de  $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$  a  $1.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Entretanto, Oliveira (1997) indica que a capacidade de transporte por acção das ondas parece ser na ordem dos  $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

De acordo com Diogo (2004), Teixeira em 1997, situou o valor do transporte longitudinal entre  $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  e  $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , referindo que o volume necessário para a erradicação da erosão das praias teria que ser da ordem dos  $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  a  $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

Andrade e Freitas (2002), referem que a elevada energia da agitação marítima na costa Oeste de Portugal faz com que esta seja uma das mais activas da Europa. A enorme quantidade de energia libertada pela rebentação das ondas traduz um intenso volume de transporte sedimentar na direcção Norte-Sul, com um valor líquido de 1 a 2 milhões de  $\text{m}^3/\text{ano}$ .

A análise dos valores expostos permite constatar que a ordem de grandeza do transporte longitudinal de sedimentos na costa Noroeste portuguesa, se traduz num balanço anual médio líquido no sentido Norte-Sul que se aproximará dos  $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ . É importante distinguir a situação de transporte bruto e transporte líquido, já que a orientação da agitação marítima incidente conduz a uma alternância do sentido de transporte, sendo a capacidade total de transporte das ondas estimada em vários milhões de metros cúbicos por ano.

#### **6.4 Abordagem do Problema de Vulnerabilidades e Riscos em Portugal**

Em Portugal, no passado já foram efectuadas tentativas de zonamento de riscos associados a probabilidades de ocorrência de determinados acontecimentos. Apresenta-se um pequeno resumo da evolução das propostas ao longo dos últimos tempos para o zonamento da orla costeira, tendo em atenção as acções energéticas do mar. Uma primeira proposta datada de 1991 (Veloso-Gomes, 1996), apontava para a delimitação de faixas com interdição de construção de novas edificações, com uma largura correspondente ao recuo previsível durante um determinado período (por exemplo, 100 anos).

Esta proposta é enfraquecida pela dúvida relativa à capacidade de uma previsão fiável do recuo da linha de costa, de acordo com o que ainda é actualmente uma dificuldade. De facto, e como foi visto atrás, a configuração da linha de costa ao longo do tempo não é determinável de uma forma fácil e está dependente de inúmeros factores.

Assim, ainda segundo Veloso-Gomes (1996), terá sido dois anos mais tarde que Alveirinho Dias apresenta a proposta de delimitação de faixas de interdição de novas edificações ou de edificabilidade condicionada, em função de um critério de altitudes. Por exemplo, seria atribuída a

interdição total para altitudes até 5 m, ocupação provisória para altitudes entre 5 m e 10 m, e entre 10 m e 25 m a ocupação seria condicionada. Nesta proposta, ignora-se ainda todo um conjunto de particularidades da morfologia local, nomeadamente se a zona é rochosa ou arenosa, orientação da costa e declives.

Em 1994, Veloso-Gomes propõe o zonamento linear ao longo da costa, com marcação cartográfica, distinguindo os trechos de risco elevado já dotados de defesas artificiais, dos trechos de risco elevado/médio com protecções naturais, os trechos de risco elevado sem protecções, os trechos de risco médio sem protecções e os trechos em fase de observação (Veloso-Gomes, 1996). Nesta proposta já é possível atender a algumas especificidades locais, mas ainda não se cruzam vários factores importantes e não se procede a uma delimitação em direcção ao interior.

#### **6.4.1 “Carta de Risco” no Trecho Barra-Vagueira**

De acordo com o referido na secção 2.1.8, no mapa do território em risco na costa portuguesa, são assinaladas as parcelas do território costeiro que se podem considerar ameaçadas pelo mar. Estes territórios estão a ser perdidos por erosão crónica, ou a tendência da evolução costeira mostra uma alta probabilidade de eles virem a ser perdidos num futuro próximo. Zonas baixas sujeitas a inundações por água do mar são também sujeitas à mesma avaliação. A perda de território por erosão é considerada permanente e irreversível (Trigo-Teixeira *et al.*, 2002).

O mapa de risco pode ser interpretado como a carta de vulnerabilidade dos territórios costeiros à acção do mar. A ocupação humana e o uso de solo não foram tidos em conta na elaboração dos mapas (Trigo-Teixeira *et al.*, 2002).

Considera-se que esta edição não corresponde ainda a um trabalho com índices bem definidos e critérios de aplicação geral para qualquer ponto costeiro do território nacional. No entanto, por ser um trabalho recente, analisam-se com algum pormenor as considerações relativas à zona costeira a Sul da barra da ria de Aveiro, inserida no trecho designado de Foz do Douro – Nazaré e todo ele considerado de risco elevado, como se visualiza na figura 6.4.

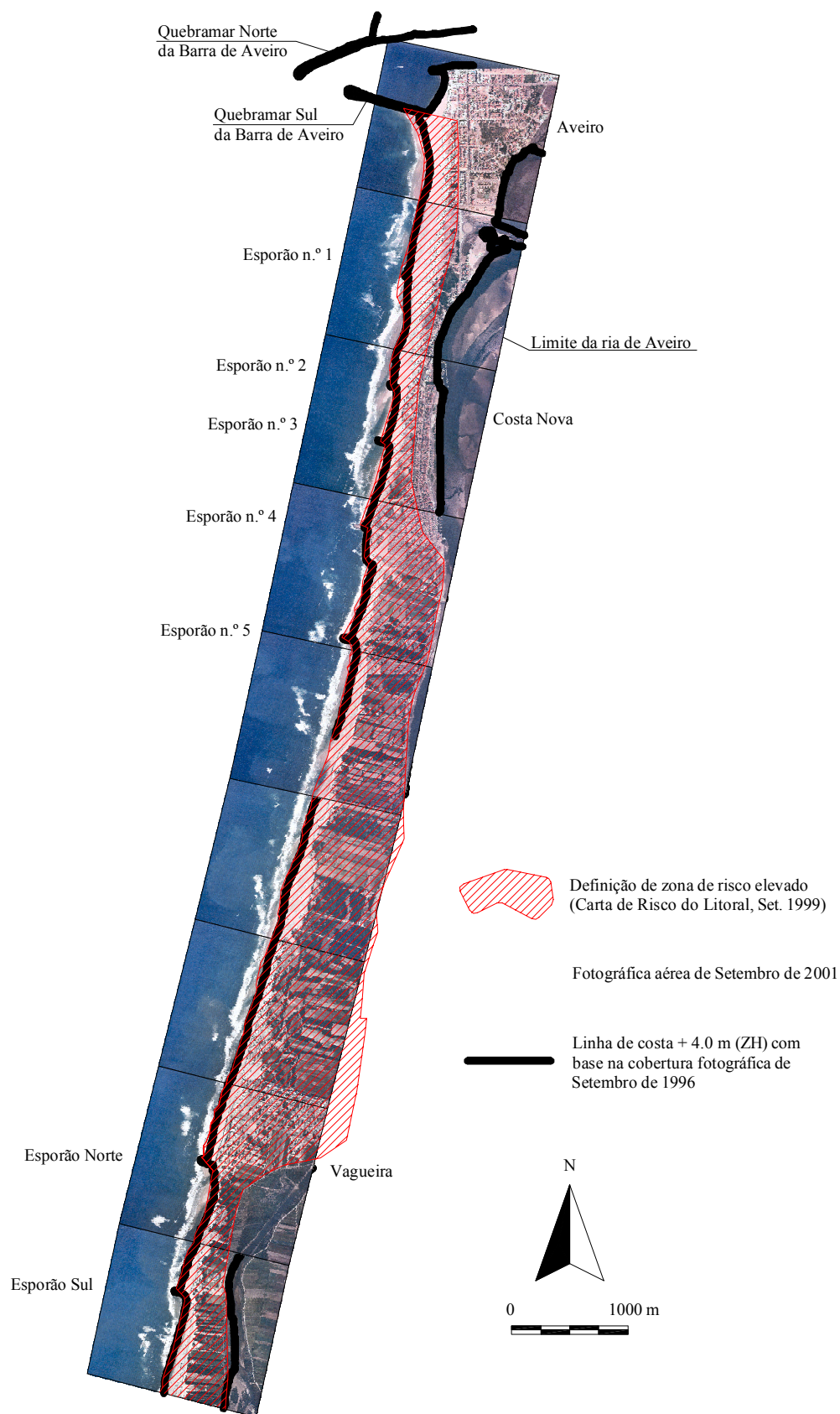


Figura 6.4: “Carta de Risco” no trecho Barra – Vagueira (retirado de CRL, 1998).

A CRL (1998) refere que a Norte dos quebramares do porto de Aveiro e devido a estes, a tendência natural é de acumulação de sedimentos e avanço da linha de costa, pelo que considera este segmento de risco baixo.

A CRL (1998) indica que o processo erosivo do segmento costeiro entre a Barra e a Costa Nova se iniciou com a construção dos quebramares da barra de Aveiro na década de 50, o que conduziu à construção de um sistema de defesa composto por esporões e obras aderentes, como já foi referido na secção 6.2.1. A comparação de levantamentos de 1973 e 1996 revela que houve acreção em cerca de 2400 m para Sul do quebramar, o que evidencia claramente a influência que o banco exterior da barra de Aveiro exerce sobre este segmento litoral.

Na zona da Costa Nova decorriam, em 1998, trabalhos de manutenção dos esporões e da defesa aderente. O último esporão presente neste segmento é rematado por uma defesa aderente em curva. A comparação dos levantamentos (1973 e 1996) mostra que o sistema de defesa tem contido a erosão na Costa Nova. Na zona da praia da Barra têm sido realizadas operações de protecção das dunas das acções antrópicas, por meio de colocação de vedações e passadiços sobrelevados de acesso à praia. Considera-se este segmento de risco elevado.

Na frente costeira entre a Costa Nova e a Vagueira, o levantamento de 1973 mostra uma restinga arenosa que separa a ria do mar com cotas muito baixas, sempre abaixo da cota +10 m (ZT) e onde o sistema dunar já nessa data era apenas vestigiário. De 1973 para cá a erosão foi violentíssima neste segmento litoral registando-se valores de recuo que nalguns pontos chegaram a atingir os 280 m, ou seja, uma taxa de recuo de cerca de 12 m/ano. À medida que se avança para Sul em direcção ao esporão Norte da Vagueira as taxas de erosão vão diminuindo progressivamente, o que suporta claramente a hipótese de rotação da costa. A duna é de pequena altura, apresenta-se por vezes descontínua e com uma falésia de erosão pronunciada. Há notícia de galgamentos oceânicos em situações de temporal. A invasão do tardoz da duna por galgamento contribui para a salinização dos terrenos. Foram identificadas manchas extensas de campos agrícolas abandonados (CRL, 1998).

Segundo os estudos de dinâmica costeira do POOC (1998) Ovar – Marinha Grande, para atingir a posição de equilíbrio estático, este trecho terá que rodar em torno do esporão Norte da Vagueira até atingir a orientação  $\alpha_N = 21^\circ$ . Importa referir, em suporte desta hipótese, que o pequeno trecho com cerca de 700 m a barlar do esporão a Sul da Costa Nova, já atingiu esta orientação. Serão de esperar recuos máximos da ordem dos 250 m, neste segmento.

Têm sido realizados alguns trabalhos de reforço dunar com a construção de paliçadas. Aproximadamente a meio deste segmento costeiro foram colocados materiais provenientes das dragagens de aprofundamento do canal de Mira. Considera-se todo este segmento litoral de risco elevado.

Na Vagueira, o levantamento de 1973 mostrava ainda uma duna bem desenvolvida que corria a toda a largura da frente urbana incipiente. Essa duna desapareceu e no seu lugar surgiu uma defesa frontal de grande altura. Os esporões e a defesa frontal têm condicionado a evolução deste segmento litoral. A praia imediatamente a Norte do esporão Norte está já muito próxima da sua orientação de equilíbrio estático. A praia entre esporões tem a configuração de equilíbrio estático, mas as variações sazonais do perfil da praia e os temporais continuam a pôr problemas.

No temporal de 29/30 de Dezembro de 1998, esteve para se dar o galgamento da duna junto ao extremo Sul da defesa frontal que se prolonga para Sul do esporão Norte. Só uma modesta paliçada evitou a ocorrência. A Norte da frente urbana foram colocados recentemente materiais provenientes das dragagens da ria. A Vagueira vive dias cada vez mais difíceis. O mar que primeiro a ameaçou pela frente começou entretanto a ameaçá-la também pelos flancos. Vencida a sobrelevação da duna ou da defesa artificial, qualquer entrada de mar é favorecida e facilitada porque o relevo apresenta pendente ligeiramente descendente no sentido da ria.

A Sul da Vagueira a erosão tem sido violentíssima. A comparação de levantamentos de 1973 e 1996 mostra que a costa recuou nalguns locais cerca de 200 m. A duna que aparecia bem desenvolvida, para Sul da Vagueira, praticamente desapareceu. Para delimitação da faixa de risco admite-se que a longo prazo o trecho a Sul do esporão Sul da Vagueira rodará em torno do ponto fixo materializado pelo esporão Norte da praia de Mira até atingir a posição de equilíbrio estático  $\alpha_N = 20^\circ$ , conforme os estudos de dinâmica costeira do POOC (1998) Ovar – Marinha Grande. Este segmento costeiro é considerado de risco elevado.

Não se apresentam as considerações para Sul da Vagueira, já que estas não incluem os esporões do Areão e Poço da Cruz entretanto construídos. No entanto, refere-se que a zona do Areão era considerada a mais grave do ponto de vista de erosão costeira e inundação de todo o litoral da região centro. A CRL (1998) considera ainda que o risco diminui à medida que se caminha para a Praia de Mira. Assim, o segmento até ao Poço da Cruz é ainda considerado de risco elevado e daí para Sul de risco médio até à Praia de Mira.

### 6.4.2 Riscos da Subida do Nível do Mar

Andrade e Freitas (2002), referem que os impactes das alterações climáticas ao largo da costa portuguesa são de difícil generalização e que portanto o que se apresenta de seguida são apenas os primeiros passos que antecipam mais trabalho de investigação. As alterações climáticas englobam:

- A subida do nível do mar;
- O aumento da temperatura e aridez e redução dos valores médios de chuva, com implicação no regime de escoamentos dos rios e provável redução dos sedimentos que chegam à costa. As alterações no regime de precipitação não devem traduzir impactes significativos nas grandes bacias hidrográficas portuguesas, devido principalmente às barragens que possuem. Em contraste, a actividade geológica derivada de rápidas inundações em pequenas bacias e escoamentos torrenciais com erosão devem aumentar;
- Aumento da altura das ondas e consequentemente da energia, bem como a rotação da sua proveniência, com tendência a ter uma origem mais de Norte, com previsível impacte na orientação dos trechos da costa entre o Douro e o Cabo Mondego.

A subida do nível do mar é trabalhada mais em pormenor, por ser alvo de maiores estudos, mas antecipam-se também efeitos nas chuvas e no clima de agitação por alterações do clima global. Os factores sócio-económicos, incluindo a actividade humana nas zonas costeiras vão ser alterados em função dos usos da costa face às alterações climáticas. Como aspecto positivo, pode-se considerar o aumento de oportunidades de emprego e trabalho em engenharia civil e costeira, já que será necessário um investimento substancial nestas áreas e nos esforços com vista a uma gestão integrada das zonas costeiras.

Segundo Andrade e Freitas (2002), as medidas estratégicas de adaptação e resposta a determinado risco são:

- A redução do risco, por decréscimo da sua probabilidade de ocorrência (protecção);
- A redução do risco, por redução dos efeitos potenciais (retirada);
- O aumento da capacidade de reacção e resposta aos efeitos do evento (acomodação).

A retirada já foi previamente utilizada em Portugal, em resposta à multiplicação das barragens, desde 1940. As populações, indústrias e serviços foram retirados das áreas inundadas pelas

albufeiras da barragem e os proprietários foram recolocados ou receberam indemnizações. O caso da barragem do Alqueva, com a retirada de toda uma povoação é um exemplo bem recente de um caso semelhante.

A retirada das zonas costeiras em perigo, à escala de todo o país teria uma dimensão sem precedentes, com inerentes custos sociais e económicos. A avaliação desses custos está ainda por efectuar. A acomodação é uma adaptação planeada e contínua do uso do território.

### 6.4.3 Aplicação da Matriz de Classificação de Vulnerabilidades e Riscos

Para uma avaliação preliminar do comportamento do critério de classificação apresentado na secção 2.2, foram escolhidos alguns pontos da costa Noroeste portuguesa. Para testar alguma diversidade de situações, foram seleccionadas a envolvente da capela do Senhor da Pedra (Gaia), a frente urbana de Espinho (Espinho), a envolvente florestal da praia de São Pedro de Maceda (Ovar), o largo do farol da Barra (Ílhavo), o parque aquático a Sul da Vagueira (Vagos) e o Cabo Mondego (Figueira da Foz).

Tabela 6.2: Classificação de parâmetros de vulnerabilidade em locais da costa Noroeste portuguesa.

Parâmetro de vulnerabilidade	Sr. Pedra	Frente Espinho	Floresta Maceda	Farol Barra	Parque Vagueira	Cabo Mondego
Topografia	4	5	5	5	5	1
Distância à linha de costa	5	4	5	5	4	4
Geologia	1	5	5	5	5	3
Geomorfologia	3	4	4	5	5	1
Revestimento do solo	4	5	1	5	4	4
Amplitudes de maré	3	3	3	3	3	3
Alturas de onda significativa	5	5	5	3	5	5
Taxas de erosão e acreção	1	2	5	2	5	1
Acções antropogénicas	4	2	5	2	5	3
Média	3.3	3.9	4.2	3.9	4.6	2.8



A tabela 6.2 mostra uma possível classificação atribuída aos diversos parâmetros de vulnerabilidade, relativamente a cada um destes locais. Note-se que o julgamento dos diversos parâmetros é efectuado em função das características actuais pelo que a alteração de determinadas condições no tempo (revestimento do solo, taxas de erosão e acreção, acções antropogénicas) podem limitar o horizonte da avaliação.

Como se verifica, atribuindo um peso equivalente a todos os parâmetros, a vulnerabilidade global varia entre 2.8 e 4.6, apesar da dificuldade de atribuição de algumas pontuações. A frente urbana de Espinho e o farol da Barra têm vulnerabilidade ligeiramente mais baixa do que a praia de Maceda e o parque aquático da Vagueira porque estão protegidas por obras de defesa. De acordo com o referido na secção 2.2.1.9, a classificação de vulnerabilidade em Espinho e na Barra, quanto às acções antropogénicas é 2 porque apesar de existirem obras de defesa para manutenção da posição da linha de costa, verificam-se também défices sedimentares originados pelos quebramares e eventuais dragagens a barlar (no Douro e em Leixões e na Barra, respectivamente). No sentido inverso, a estabilidade e a não previsibilidade de défices sedimentares originados pelo Homem na região do Cabo Mondego, permite baixar para 3 a classificação de local sem intervenções e sem evidência de redução nas fontes sedimentares.

O efeito das obras de defesa reflecte-se também nas taxas de erosão registadas nos últimos anos, significativamente menores em Espinho e na Barra, do que em Maceda e na Vagueira. A capela do Senhor da Pedra está localizada numa zona com afloramentos rochosos, sem registos de erosão. Considerou-se também que nas serras calcárias e margosas que constituem o Cabo Mondego não se registariam erosões. Na Barra, a protecção conferida pelos quebramares permite a consideração de alturas de onda menores, conduzindo a uma menor vulnerabilidade neste parâmetro.

Considerando coeficientes de ponderação, se for reduzido o peso do revestimento do solo na vulnerabilidade global, a praia de São Pedro, em Maceda, agrava o seu nível de vulnerabilidade relativamente aos outros locais. O mesmo sucede se for aumentado o peso das acções antropogénicas. Neste caso com consequências também para a classificação da vulnerabilidade do parque aquático a Sul da Vagueira. Ao agravar o peso da geologia e da geomorfologia, os índices de vulnerabilidade global da capela do Senhor da Pedra e do Cabo Mondego reduzem, comparativamente com os outros locais.

A tabela 6.3 classifica os parâmetros de risco dos diversos locais. Tal como na classificação das vulnerabilidades, esta classificação foi obtida por estimativa, com base no conhecimento intuitivo das características dos locais.

Tabela 6.3: Classificação dos parâmetros de risco em locais da costa Noroeste portuguesa.

Local	Parâmetros de risco			
	Humano	Económico	Ambiental	Património
Sr. Pedra	Médio	Elevado	Muito baixo	Elevado
Frente Espinho	Elevado	Elevado	Muito baixo	Elevado
Floresta Maceda	Muito baixo	Muito baixo	Baixo	Muito baixo
Farol Barra	Médio	Elevado	Muito baixo	Elevado
Parque Vagueira	Baixo	Baixo	Elevado	Baixo
Cabo Mondego	Baixo	Baixo	Médio	Baixo

Na capela do Sr. da Pedra, na floresta envolvente à praia de Maceda, no farol da Barra e no Cabo Mondego foi adoptado como parâmetro de risco condicionante a média aritmética das classificações expressas na tabela. Na Vagueira, a classificação de risco condicionante situa-se entre o risco baixo e médio, pelo que foi adoptada a situação mais gravosa. Apenas Espinho é condicionado pelo risco humano, já que a média seria mais próxima do parâmetro de risco médio.

Tabela 6.4: Classificação global do risco em locais da costa Noroeste portuguesa.

Local	Parâmetro de risco condicionante	Vulnerabilidade global	Classificação de risco
Sr. Pedra	Médio	3	III – Risco médio
Frente Espinho	Elevado	4	V – Risco muito elevado
Floresta Maceda	Muito baixo	4	II – Risco baixo
Farol Barra	Médio	4	IV – Risco elevado
Parque Vagueira	Médio	5	V – Risco muito elevado
Cabo Mondego	Baixo	3	II – Risco baixo

Consultando a matriz da tabela 2.26, a classificação final de risco dos diversos locais é a apresentada na tabela 6.4. Apesar de todos os locais serem classificados com uma vulnerabilidade bastante elevada, a classificação de risco é diversa. Em Maceda, porque não há infra-estruturas,

população ou património em causa, as consequências das acções energéticas do mar reflectem pouco perigo, mas existe uma efectiva perda de território em zona florestal. O Cabo Mondego tem a mesma classificação devido ao baixo risco e vulnerabilidade mediana. A zona a Sul da Vagueira tem a mesma classificação da frente urbana de Espinho, essencialmente devido à elevada vulnerabilidade que apresenta. Em Espinho, é a numerosa população junto à costa que condiciona a classificação de risco, conduzindo ao valor mais elevado da matriz. A vulnerabilidade intermédia correspondente à situação da capela do Senhor da Pedra em conjugação com a situação de risco condicionante médio conduziu a uma classificação de risco médio para este local. O farol da Barra, com o mesmo risco condicionante mas maior vulnerabilidade resulta numa classificação global de risco elevado.

Note-se que a CRL (1998) atribui as seguintes classificações para estes lugares, divididos em apenas três classes de risco (baixo, médio e elevado). A capela do Sr. da Pedra situada no trecho entre Valadares e Miramar é classificada de risco médio, apesar da grande estabilidade do segmento litoral. O espraio da onda pode provocar inundações e destruição em situações de temporal, em toda a frente marítima. A frente urbana a Sul do esporão Norte de Espinho é classificada de risco elevado, por ser desde esta zona para Sul que a geomorfologia do litoral deixa de apresentar afloramentos rochosos. A envolvente florestal de Maceda é classificada de risco elevado devido às intensas taxas de erosão que regista. Na realidade essa classificação corresponde à elevada vulnerabilidade do local. A Barra também é considerada de risco elevado, apesar de ser referido que o sistema de defesa tem contido a erosão. A região a Sul da Vagueira tem registado violentas erosões, sendo também considerada de risco elevado. Novamente, na realidade esta classificação corresponde principalmente à elevada vulnerabilidade. Ao Cabo Mondego não é atribuída classificação na CRL (1998), entendendo-se que deve ser mantida observação sobre o local.

Na generalidade existe correspondência entre as classificações apresentadas na CRL (1998) e as obtidas pela matriz proposta na secção 2.2.3, principalmente atendendo ao facto da “Carta de Risco” dever ser entendida como uma carta de vulnerabilidade costeira às acções energéticas do mar. O traçado da “Carta de Risco” não é condicionado pelo uso que se faz dos territórios costeiros, nomeadamente pela ocupação humana e pela existência de edificações (CRL, 1998). Assim, a matriz de classificação proposta neste trabalho representa mais um contributo na avaliação de vulnerabilidades e riscos.

É de realçar que o exercício de classificação que se apresentou envolve um grau de subjectividade apreciável, o qual pode ser de certa forma controlado através de uma análise de sensibilidade dos pesos a atribuir aos diversos parâmetros envolvidos. A avaliação destes mesmos parâmetros por entidades diversas resulta certamente em diferenças de resultado (mesmo que ligeiras) pelo que a análise ponderada de uma equipa de vários elementos pode diminuir o grau de subjectividade da avaliação. A consideração de diversos horizontes de projecto para a classificação dos riscos, com zonamento cartográficos, exige uma análise dinâmica dos fenómenos, ao longo do tempo, ainda não contemplada.

### **6.5 Cenários de Agitação**

Para a aplicação de uma grande diversidade dos modelos costeiros apresentados, é necessário definir um clima de agitação, como dado do problema. Como visto no capítulo 3, a agitação na costa portuguesa pode ser classificada como energética, com um padrão de comportamento bastante lato, quer no que se refere à caracterização de rumos de proveniência, quer no que se refere a alturas de onda.

Com base em toda a avaliação estatística dos elementos analisados no capítulo 3, são agora projectados cenários eventuais de agitação marítima ao largo. Esses cenários serão aplicados posteriormente, por exemplo, na avaliação das condições locais de agitação.

De acordo com o que já se verificou, a agitação marítima não segue nenhum padrão definido (exceptuando as marés astronómicas) e como tal, a conjugação das diversas variáveis que caracterizam os estados do mar permite a geração de uma infinidade de cenários. O critério utilizado para a projecção destes cenários foi a criação de um número de classes ou estados de agitação representativas da generalidade das hipóteses.

Em relação a alturas de onda foram admitidas cinco classes, com maior discretização para as menores alturas de onda (mais frequentes) e classes mais latas para alturas de onda superior, mas menos frequentes. Para cada uma destas classes de alturas de onda foram adoptados como representativos a altura significativa média e o período médio.

Tabela 6.5: Cenários de alturas de onda para caracterização de um ano típico de agitação.

Classe de $H_S$ (m)	Ocorrência	$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	$d_b$ (m)
$\leq 1$	15.2%	0.8	7.6	1.03
1 – 2	41.6%	1.5	8.7	1.92
2 – 3	21.8%	2.4	10.2	3.08
3 – 6	19.5%	4.2	12.1	5.38
$> 6$	1.9%	6.8	13.9	8.72

Na tabela 6.5,  $d_b$  representa a profundidade da rebentação de cada classe de onda, de acordo com a expressão 3.6, definida anteriormente. A conjugação destes cinco cenários com os rumos de agitação cria um número elevado de cenários. Cada quadrante engloba uma abertura de  $22.5^\circ$  e é representado pelo seu valor médio, como exposto na tabela 6.6. Por não terem representatividade, eliminaram-se as hipóteses de rumos de Norte e de Sul, considerando-se as restantes sete classes de rumos. Cinco tipos de ondas com sete direcções distintas, eleva para 35 o número de cenários ou estados a projectar. Na última coluna da tabela 6.6 são apresentadas as percentagens de ocorrência de cada rumo, que diferem ligeiramente das apresentadas na figura 3.7 porque aqui não se englobam os dados de rumos dos quais não se possui correspondente altura de onda.

Tabela 6.6: Cenários de rumos de ondulação e vento, para caracterização de um ano típico de agitação marítima.

Quadrante	Ângulo da onda com o Norte *	Ângulo do vento com o Norte *	Ocorrências
NNW	337.5°	323°	12.4%
NW	315.0°	302°	42.0%
WNW	292.5°	281°	34.0%
W	270.0°	264°	7.7%
WSW	247.5°	234°	1.9%
SW	225.0°	212°	1.5%
SSW	202.5°	197°	0.5%

\* Esta direcção é expressa em graus, medida no sentido dos ponteiros do relógio, a partir do Norte geográfico (90 - Este; 180 - Sul; 270 - Oeste; 360 - Norte).

Na aplicação do programa SWAN, para a projecção da agitação local, é necessário incluir dados relativos ao vento. Assim, foi adoptada apenas uma direcção do vento para cada classe de direcção de ondulação, de forma a não aumentar o número de cenários a projectar. A direcção de vento foi escolhida com base na tabela 6.6, de onde se eliminaram os registos de vento dos quadrantes NE, E e SE. Estes registos representavam cerca de 25% dos registos de ventos para cada quadrante de agitação. Apenas na situação de ondulação de SSW, os ventos de SE foram considerados, por já serem significativos. Os valores da direcção de vento na tabela 6.6 resultaram da média dos registos de vento de todos os outros quadrantes.

Como já foi referido, é evidente a alta correlação entre a direcção de ventos e das ondas. Obteve-se sempre como valor médio da direcção do vento, uma ligeira rotação para Sul em relação à proveniência da onda (entre 5° e 14° de diferença). Verifica-se assim, que em termos médios, as diferenças com as direcções adoptadas em Coelho e Veloso-Gomes (2003) não são significativas.

Para cada relação de classes de alturas de onda significativa e rumos de ondulação foram identificadas as frequências de ocorrência. Assim, as probabilidades de ocorrência de cada classe são visualizadas na tabela 6.7 e representam um ano médio de agitação. A ordenação lógica destes cenários ou estados de agitação poderá criar um ano típico de agitação. A simulação a longo prazo do clima de agitação poderá recorrer à aplicação destes anos de agitação típica. Conhecendo um ano médio de agitação, podem também ser criados cenários de agitação atípica, valorizando determinados rumos ou alturas de onda.

Tabela 6.7: Frequências de ocorrências de ondulação em ano médio (%).

Classe de $H_s$ (m)	Rumos							$\Sigma$
	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	
$\leq 1$	2.4	6.0	5.1	1.2	0.3	0.1	0.1	15.2
1 – 2	7.0	17.7	12.4	3.1	0.6	0.6	0.2	41.6
2 – 3	2.4	9.1	7.2	1.7	0.6	0.6	0.2	21.8
3 – 6	0.6	8.4	8.5	1.4	0.4	0.2	0.0	19.5
>6	0.0	0.8	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	1.9
$\Sigma$	12.4	42.0	34.0	7.7	1.9	1.5	0.5	100

Para o estudo da propagação da onda desde o largo até à costa, irá recorrer-se ao modelo numérico de cálculo SWAN. Para tal, a tipificação de situações de agitação é fundamental. Assim, no ponto 6.6 deste trabalho utilizam-se estes cenários de agitação. Na secção 6.11 deste capítulo, na aplicação do modelo de configuração de linha de costa, também serão aplicados os resultados de agitação aqui apresentados.

## **6.6 Projecção da Agitação Local**

Pretendendo-se que o clima de agitação caracterizado pelos registos na bóia de Leixões seja transformado no clima sentido sobre a zona em estudo, foi aplicado o modelo numérico de cálculo SWAN, procedendo-se à modelação da frente costeira, desde São Jacinto até aos Palheiros da Tocha.

Este modelo de cálculo tem algumas limitações, destacando-se o facto do programa não modelar a difracção que ocorre em torno de obstáculos. O programa também não calcula as correntes induzidas pela ondulação, podendo estas ser simuladas na introdução de dados do SWAN. À escala de trabalho considera-se que estas limitações não traduzem diferenças significativas nos resultados, interessando neste ponto avaliar essencialmente os fenómenos da refracção e do empolamento.

Para efectuar estes propósitos foram necessários diversos elementos, dos quais se destaca a cartografia, para além dos já referidos registos de ventos e dados da bóia ondógrafo de Leixões. Para a caracterização da batimetria ao largo da costa foi utilizada a carta da série de pescas do Instituto Hidrográfico. A carta n.º 24202 (Aveiro - Peniche) foi editada em Outubro de 2000. Esta carta está representada à escala 1:150000 e utiliza o sistema de coordenadas Datum Europeu de 1950. À digitalização da carta e transformação do sistema de coordenadas para Datum Lisboa fica associado algum erro, que se conjuga também com o facto da carta ter por base dados de batimetria obtidos entre 1973 e 1995, com o complemento de pontos de levantamentos hidrográficos de 1913. No entanto, após terem sido solicitados ao Instituto Hidrográfico elementos de batimetria, as cartas de pescas foram indicadas como os melhores elementos disponíveis.

Como a carta não apresenta com o rigor necessário as cotas topográficas na zona junto da costa, foi ainda necessário associar os dados topográficos retirados do levantamento aerofotogramétrico realizado em 1996, que apresenta curvas de nível espaçadas de 2.0 m.

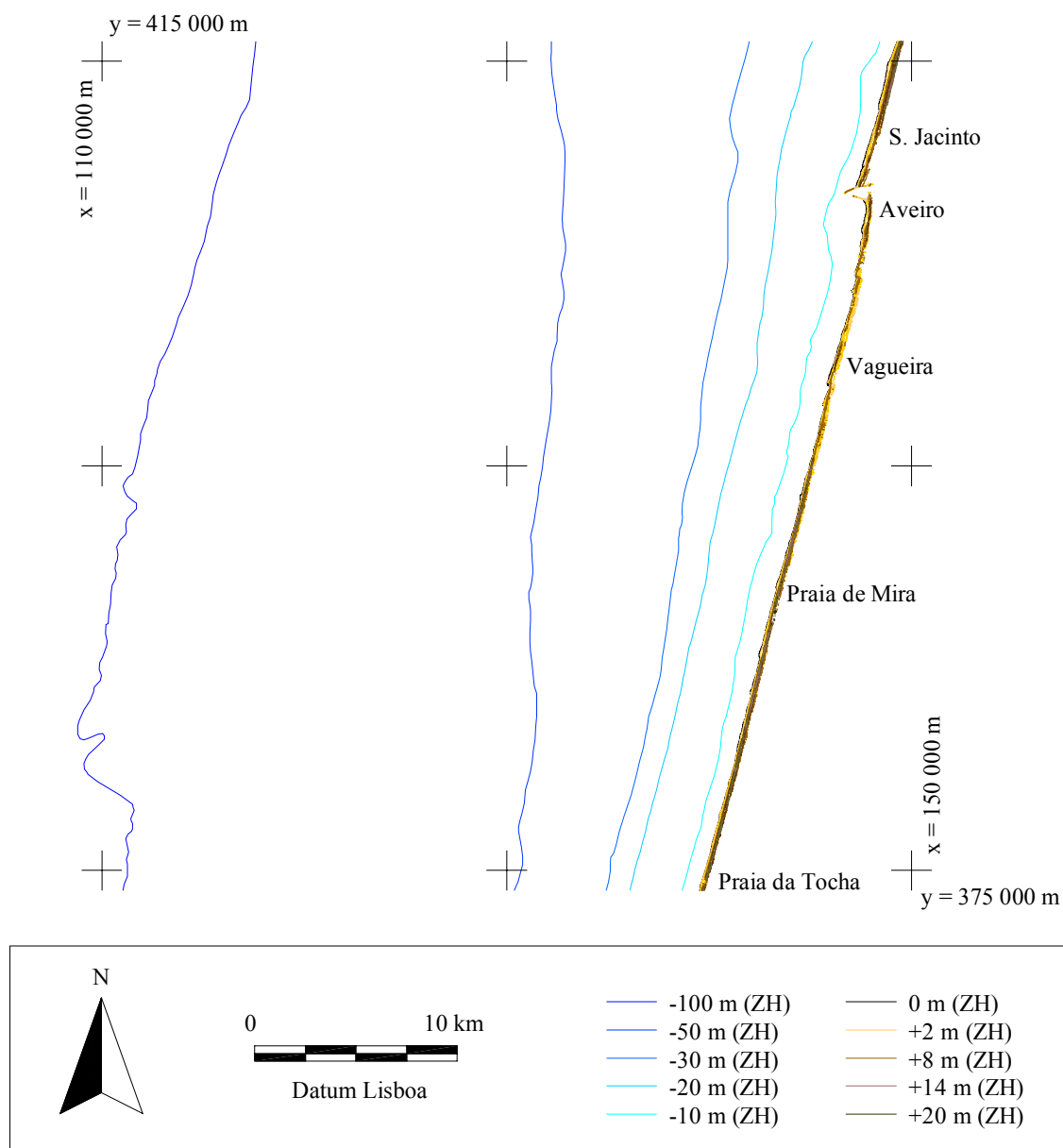


Figura 6.5: Representação dos elementos topográficos e batimétricos disponíveis na área de estudo.

Com base nos diversos pontos (1057) retirados da carta da série de pescas numa área de  $42 \times 42\text{ km}^2$ , adicionados aos que o levantamento aéreo permitiu obter (2418), sendo todos estes com cota superior à do nível 0.0 m (ZH), a costa em estudo ficou representada por 3687 pontos cotados (por aproximação, foi criada uma linha de 212 pontos à cota +25 m (ZH) para definição do limite da zona modelada). Com estes dados foi gerada por interpolação uma malha regular de pontos coordenados que caracterizam a altimetria da região. Na figura 6.6 é possível observar que acima da cota +20 m (ZH) não há diferenciação da topografia, por não existir representatividade dos elementos utilizados. A malha criada tem espaçamento de  $200 \times 200\text{ m}^2$ , ocupando uma área



central de  $40 \times 40 \text{ km}^2$ , interior à atrás referida, perfazendo 40401 pontos. As coordenadas do ponto mais a Sudoeste desta área, no sistema de coordenadas Datum Lisboa, são as coordenadas  $x = 110000 \text{ m}$  e  $y = 375000 \text{ m}$ , sendo visíveis na figura 6.5.

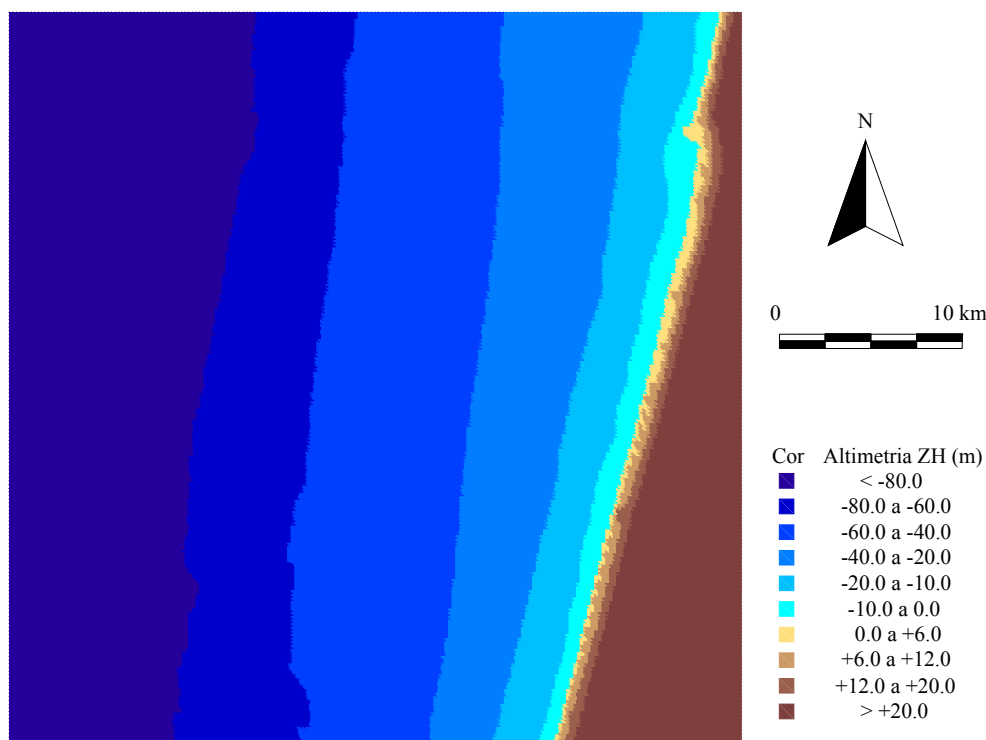


Figura 6.6: Representação em planta de  $40 \times 40 \text{ km}^2$  da área de estudo, como resultado da modelação 3D do terreno, após utilização dos elementos de batimetria e topografia disponíveis.

Dentro da área em análise foram criadas três zonas de menores dimensões para desenvolvimento do cálculo (representadas nas figuras 6.8 e 6.9). Estas regiões são analisadas em malhas de pontos espaçados de 100 m, pois verificou-se ser esta a melhor relação entre tempo de cálculo e rigor de resultados. Cada zona ocupa uma área de  $6 \times 20 \text{ km}^2$ , da qual são analisados os  $6 \times 10 \text{ km}^2$  interiores, desprezando-se os restantes valores por instabilidades de cálculo junto às fronteiras do modelo.

Para a avaliação das condições da agitação local, constata-se que as diferenças obtidas nos cálculos com o nível de água correspondente às cotas de máxima baixa-mar de águas vivas (0 m ZH), do nível médio (+2.0 m ZH) e máxima preia-mar de águas vivas (+4.0 m ZH) não são significativas, quando comparadas com outros erros de previsão. A diferença de resultados estará relacionada com o fenómeno de refração, que difere com a profundidade da batimetria considerada.

A tabela 6.8 exemplifica as diferenças de resultados para a consideração dos diversos níveis de água. Foram analisados os resultados a duas profundidades distintas e para duas alturas de onda também diferentes. No exemplo estudado, a proveniência das ondas considerada foi de NW. O modelo de cálculo não permite obter os resultados para baixas profundidades em maré baixa. Como se verifica, as diferenças de resultados são em geral inferiores a 10%, denotando-se as maiores diferenças para a menor altura de onda quando se estudam as baixas profundidades. Nessa situação, a diferença de alturas de onda é de 13%, enquanto os períodos de onda diferem em 3.4%. A diferença de rumos locais é de 2.4°. Note-se que devido à discretização da malha do modelo, as profundidades avaliadas não correspondem exactamente aos 2.5 m e aos 5.0 m para os três níveis de água estudados. Este facto também justifica algumas das diferenças registadas.

Tabela 6.8: Avaliação da importância do nível de maré nas características locais da onda.

Onda ao largo		Nível de maré (m)	Profundidade de 5.0 m			Profundidade de 2.5 m		
$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)		$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	Rumo (°)	$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	Rumo (°)
1.5	8.7	0.0 (ZH)	1.45	7.40	296.5			
		2.0 (ZH)	1.47	7.26	296.1	1.28	7.23	292.0
		4.0 (ZH)	1.47	7.41	295.1	1.14	7.48	294.4
4.2	12.1	0.0 (ZH)	2.73	9.74	295.0			
		2.0 (ZH)	2.56	9.70	294.5	1.66	9.63	291.6
		4.0 (ZH)	2.77	9.79	294.0	1.58	9.87	293.4

Perante estes resultados, optou-se por não duplicar ou triplicar os cenários de agitação com a utilização de mais do que um nível de maré. Os cálculos desenvolvidos na aplicação do SWAN tiveram por base o nível médio da água do mar, ou seja, a cota +2.0 m (ZH).

Como se verificou atrás, para cada altura de onda ao largo, corresponde uma vasta gama de períodos de onda. Para avaliar da importância do período de onda a considerar no cálculo da propagação da onda até à costa, foram estudadas as características da onda em duas profundidades distintas (4.93 m e 2.50 m) e para dois períodos de onda também distintos.

Os períodos de onda utilizados (8.7 s e 12.1 s) representam uma diferença de quase 40%, no entanto, a análise da tabela 6.9 permite constatar diferenças nas alturas de onda locais inferiores a 10%, sendo que as ondas de maior período resultam junto à costa em alturas de onda superiores. A

diferença nos rumos locais obtidos é no máximo de  $1.3^\circ$ , sendo as ondas de maior período as que sofrem menor refração. Assim, pode considerar-se como pouco significativo o efeito da variação do período de onda ao largo nos resultados de rumos e alturas de onda locais. Por este motivo e de forma a não aumentar cenários de agitação ao largo, adopta-se para cada classe de altura de onda, um só período de onda, correspondente ao valor médio da classe de altura de onda, de acordo com a tabela 6.5.

Tabela 6.9: Avaliação da importância do período de onda nas características locais da onda.

Onda ao largo			Ponto (144600; 395000; 4.93)		Ponto (144900; 395000; 2.50)			
Rumo	$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	Rumo ( $^\circ$ )	$H_S$ (m)	$T_{Hs}$ (s)	Rumo ( $^\circ$ )
NW	1.5	8.7	1.47	7.26	296.1	1.28	7.23	292.0
		12.1	1.61	9.48	294.8	1.40	9.54	291.0
	4.2	8.7	2.42	7.42	295.2	1.53	7.34	292.1
		12.1	2.56	9.70	294.5	1.66	9.63	291.6
W	1.5	8.7	1.60	7.64	276.6	1.38	7.04	276.3
		12.1	1.73	9.98	277.2	1.49	9.34	276.8
	4.2	8.7	2.47	7.32	274.7	1.60	7.00	273.0
		12.1	2.61	9.53	275.4	1.72	9.15	273.8

Após as considerações expostas, foi aplicado o modelo de propagação de ondas a um espectro de ondas do tipo Pierson-Moscowitz, com correspondente altura de onda significativa e respectivo período iguais aos diversos cenários projectados. Cinco alturas significativas ao largo, provenientes de sete rumos diferentes conduziram a 35 cenários e consequentemente a igual número de aplicações do modelo para cada uma das três zonas.

A figura 6.7 permite a visualização dos resultados obtidos para as três zonas consideradas (totalizando 30 km de extensão), em três dos cenários (ondas provenientes de WNW com altura significativa de 4.2 m, ondas provenientes de W com altura significativa de 1.5 m e ondas provenientes de WSW com altura significativa de 2.4 m). A escala de cores corresponde à variação da altura significativa na propagação para a costa, com evidentes variações na zona mais próxima da costa, zona que só atingem as ondas do espectro correspondentes a menores alturas significativas. O efeito do empolamento das ondas é também visível, principalmente nas ondas de menor altura (cor acastanhada nas figuras 6.7-b e 6.7-c).

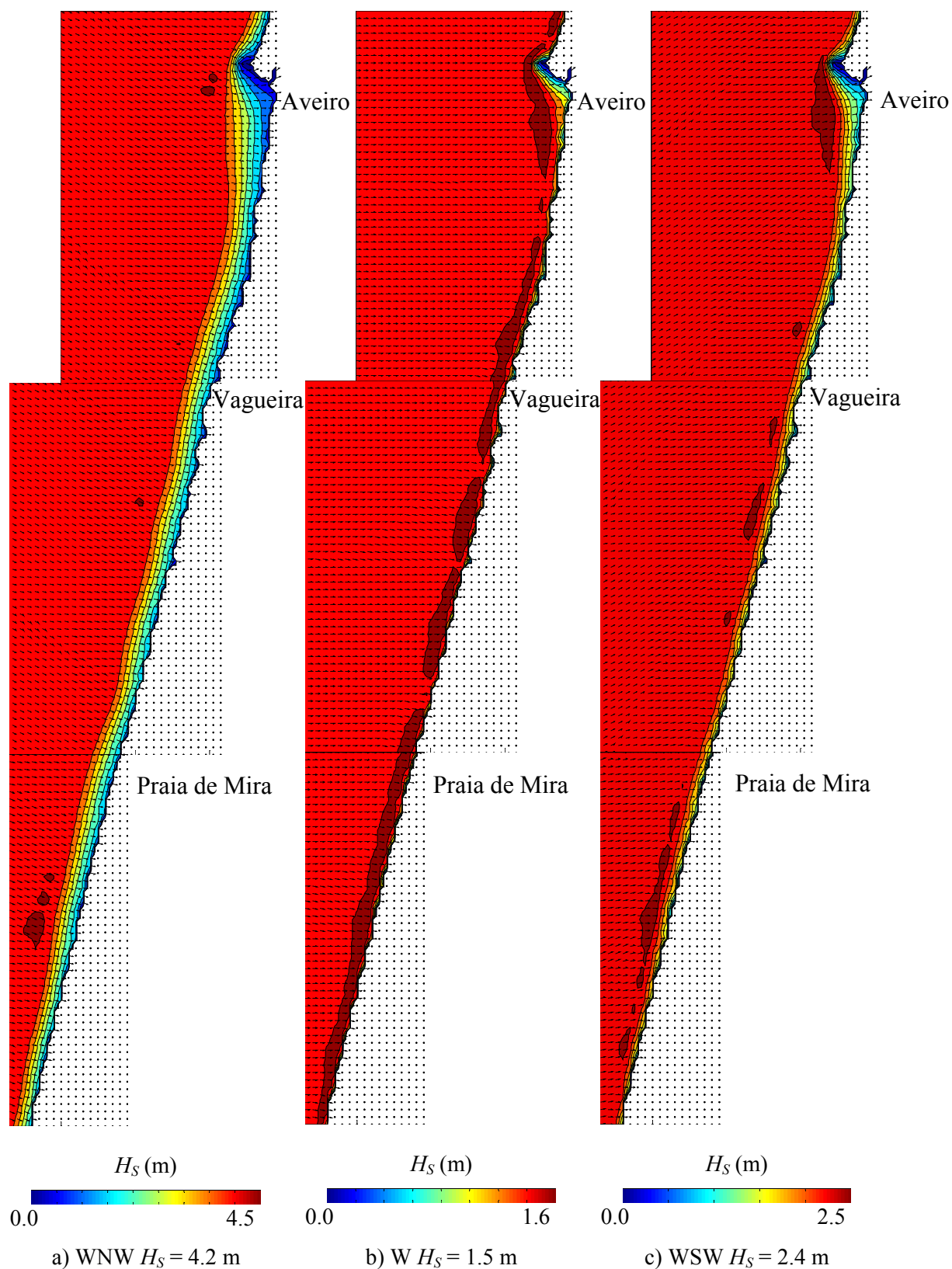


Figura 6.7: Representação da altura significativa do espectro de onda, em três cenários distintos de agitação e representação vectorial da sua direcção de propagação (resultados da aplicação do modelo SWAN).

Na figura 6.7, os vectores representam a orientação da onda nos diversos pontos das grelhas modeladas, espaçados 100 m em ambas as direcções. A direcção dos vectores corresponde à direcção de propagação da onda em cada ponto. Durante a aproximação da onda à costa é evidente a rotação dos diversos vectores, aproximando-se da perpendicular à própria costa.

As tabelas seguintes permitem uma análise detalhada dos diversos cenários de propagação de ondas desde o largo até à costa. Os resultados são referentes a dois alinhamentos distanciados dezoito quilómetros entre si, correspondentes a  $y = 404000$  m e a  $y = 386000$  m. Como é visível na figura 6.5, ou nas figuras 6.8 e 6.9, as linhas batimétricas junto ao alinhamento a Sul estão mais próximas entre si, indiciando uma mais rápida redução das profundidades neste alinhamento. Este aspecto reflecte-se nos resultados, já que a onda sofre a influência dos fundos durante um menor período de tempo e consequentemente as suas características não são tão alteradas como no caso do alinhamento  $y = 404000$  m. Assim, aos resultados apresentados na parte direita das tabelas (alinhamento  $y = 386000$  m) correspondem sempre alturas de onda superiores quando comparadas com as mesmas profundidades do alinhamento  $y = 404000$  m.

Tabela 6.10: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por  $H_s = 0.8$  m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).

		Alinhamento $y = 404000$ m						Alinhamento $y = 386000$ m				
		Profundidade (m)										
		Ao largo	8.73	5.32	3.11	1.92	1.03	8.72	5.38	3.08	1.92	1.33
Rumos de proveniência ao largo	NNW	0.80	0.57	0.57	0.56	0.53	0.40	0.59	0.59	0.61	0.61	0.57
	NW	0.80	0.70	0.71	0.72	0.69	0.51	0.74	0.75	0.80	0.77	0.68
	WNW	0.80	0.77	0.79	0.81	0.76	0.56	0.79	0.82	0.87	0.84	0.74
	W	0.80	0.78	0.80	0.82	0.75	0.55	0.80	0.83	0.89	0.85	0.75
	WSW	0.80	0.75	0.76	0.78	0.70	0.51	0.77	0.80	0.85	0.82	0.73
	SW	0.80	0.66	0.66	0.66	0.58	0.43	0.69	0.71	0.75	0.72	0.66
	SSW	0.80	0.50	0.49	0.48	0.41	0.31	0.55	0.55	0.57	0.56	0.53
Amplitude (°)												
NNW-SSW		135.0	73.0	57.8	38.1	27.7	27.4	74.2	60.0	45.0	36.6	30.8

Tabela 6.11: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por  $H_S = 1.5$  m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).

		Alinhamento $y = 404000$ m						Alinhamento $y = 386000$ m				
		Profundidade (m)										
		Ao largo	8.73	5.32	3.11	1.92	1.03	8.72	5.38	3.08	1.92	1.33
Rumos de proveniência ao largo	NNW	1.50	1.03	1.06	1.08	0.96	0.70	1.09	1.11	1.15	1.02	0.85
	NW	1.50	1.31	1.36	1.34	1.08	0.78	1.40	1.46	1.42	1.16	0.93
	WNW	1.50	1.44	1.52	1.44	1.12	0.81	1.53	1.62	1.52	1.21	0.94
	W	1.50	1.48	1.57	1.47	1.12	0.81	1.54	1.64	1.54	1.23	0.97
	WSW	1.50	1.42	1.49	1.43	1.09	0.79	1.47	1.57	1.50	1.21	0.93
	SW	1.50	1.22	1.26	1.27	1.01	0.73	1.31	1.38	1.37	1.14	0.91
	SSW	1.50	0.91	0.92	0.92	0.79	0.57	1.01	1.05	1.09	0.99	0.84
Amplitude (°)												
NNW-SSW		135.0	65.1	51.2	33.0	23.3	23.3	66.3	53.3	40.1	35.0	33.2

Tabela 6.12: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por  $H_S = 2.4$  m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).

		Alinhamento $y = 404000$ m						Alinhamento $y = 386000$ m				
		Profundidade (m)										
		Ao largo	8.73	5.32	3.11	1.92	1.03	8.72	5.38	3.08	1.92	1.33
Rumos de proveniência ao largo	NNW	2.40	1.69	1.77	1.52	1.16	0.84	1.81	1.88	1.63	1.26	0.99
	NW	2.40	2.15	2.22	1.62	1.18	0.85	2.35	2.38	1.74	1.30	1.00
	WNW	2.40	2.40	2.40	1.65	1.18	0.86	2.58	2.58	1.77	1.31	1.01
	W	2.40	2.47	2.47	1.66	1.19	0.86	2.59	2.58	1.80	1.33	1.02
	WSW	2.40	2.36	2.38	1.65	1.19	0.86	2.47	2.50	1.78	1.33	1.02
	SW	2.40	2.02	2.09	1.62	1.16	0.84	2.19	2.28	1.72	1.29	1.00
	SSW	2.40	1.48	1.53	1.44	1.08	0.78	1.68	1.78	1.58	1.25	0.98
Amplitude (°)												
NNW-SSW		135.0	61.1	47.8	29.8	21.9	21.9	62.2	49.6	38.6	34.9	32.9

Tabela 6.13: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por  $H_S = 4.2$  m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).

		Alinhamento $y = 404000$ m						Alinhamento $y = 386000$ m					
		Profundidade (m)											
		Ao largo	8.73	5.32	3.11	1.92	1.03	8.72	5.38	3.08	1.92	1.33	
Rumos de proveniência ao largo	NNW	4.20	3.09	2.72	1.66	1.20	0.87	3.35	2.84	1.81	1.34	1.03	
	NW	4.20	3.81	2.88	1.67	1.20	0.87	4.07	2.98	1.81	1.34	1.03	
	WNW	4.20	4.07	2.93	1.70	1.22	0.88	4.26	3.04	1.86	1.38	1.04	
	W	4.20	4.12	2.95	1.72	1.24	0.90	4.26	3.05	1.86	1.37	1.05	
	WSW	4.20	4.01	2.90	1.70	1.23	0.89	4.15	3.00	1.83	1.36	1.04	
	SW	4.20	3.64	2.83	1.69	1.23	0.88	3.86	2.93	1.81	1.35	1.05	
	SSW	4.20	2.70	2.54	1.66	1.18	0.85	3.09	2.75	1.77	1.32	1.03	
Amplitude (°)													
NNW-SSW		135.0	58.7	45.2	28.4	21.3	21.4	59.7	47.3	37.8	34.2	32.6	

Tabela 6.14: Altura significativa do espectro de onda caracterizado ao largo por  $H_S = 6.8$  m, durante a sua propagação até à costa (expressa em metros).

		Alinhamento y = 404000 m						Alinhamento y = 386000 m					
		Profundidade (m)											
		Ao largo	8.73	5.32	3.11	1.92	1.03	8.72	5.38	3.08	1.92	1.33	
Rumos de proveniência ao largo	NNW	6.80	4.19	2.92	1.68	1.22	0.89	4.38	3.02	1.84	1.37	1.06	
	NW	6.80	4.32	2.96	1.71	1.24	0.90	4.50	3.06	1.85	1.37	1.06	
	WNW	6.80	4.44	3.06	1.80	1.31	0.94	4.60	3.15	1.93	1.42	1.07	
	W	6.80	4.49	3.06	1.79	1.31	0.95	4.60	3.14	1.88	1.40	1.08	
	WSW	6.80	4.36	3.00	1.77	1.30	0.94	4.51	3.10	1.91	1.43	1.11	
	SW	6.80	4.22	2.92	1.73	1.26	0.91	4.36	3.02	1.85	1.39	1.09	
	SSW	6.80	3.98	2.86	1.69	1.22	0.88	4.19	2.96	1.83	1.38	1.07	
Amplitude (°)													
NNW-SSW		135.0	57.1	44.5	29.5	22.4	22.4	58.1	47.3	38.9	35.7	34.3	

As amplitudes de rosas de rumos locais também são mais latas no alinhamento  $y = 386000$  m. Como se apresenta na última linha das tabelas 6.10 a 6.14, a proveniência de rumos testada representa uma amplitude de  $135^\circ$ , desde o quadrante NNW até ao quadrante SSW. Esta origem de rumos ao largo não se reflecte da mesma forma junto à costa. Assim, para as ondas de pequena dimensão e que sofrem a rebentação já muito próximo da costa, com o fenómeno da refacção a prolongar-se numa maior extensão, o rumo obtido tem na generalidade dos casos uma amplitude muito pequena, na ordem dos  $20^\circ$  a  $35^\circ$ . Para as águas mais profundas, onde se dá a rebentação das ondas maiores, as amplitudes verificadas ultrapassam os  $55^\circ$ , atingindo quase os  $75^\circ$  para as ondas de menor altura e menos afectadas pela refacção a essas profundidades.

Relativamente a alturas de onda significativa, verifica-se que após a passagem das profundidades prováveis de rebentação das alturas de onda que caracterizam cada cenário, apenas as ondas de menor altura continuam a sua propagação na direcção da costa, reduzindo consequentemente o valor da altura de onda obtido. Assim, o cenário de ondas mais altas (6.8 m de altura significativa, com rebentação provável a cerca de 8.7 m de profundidade), rapidamente vai reduzindo as alturas para as menores profundidades, uniformizando também os valores, independentemente do rumo de proveniência. As ondas de alturas intermédias e baixas podem até sofrer algum empolamento antes da profundidade de rebentação, mas para os rumos extremos (principalmente NNW, SW e SSW) o efeito da refacção sobrepõe-se, reduzindo a altura das ondas. Novamente, após a profundidade de rebentação provável para cada cenário, há uma uniformização das alturas de onda para todos os rumos (como exemplo, indica-se o cenário com ondas de 2.4 m altura, que não tem diferenças importantes entre alturas nos diversos rumos, para as duas profundidades menores).

As figuras 6.8 e 6.9 representam as rosas de rumos nas diversas profundidades dos dois alinhamentos estudados. O critério de representação das rosas de rumos locais corresponde ao sentido do rumo em cada ponto, sendo o comprimento de acordo com a probabilidade de ocorrência desse rumo ao largo, de acordo com o definido na tabela 6.6. Como para cada altura de onda, a propagação de cada rumo de onda evolui de forma diferente, são indicadas 25 rosas de rumos locais para cada alinhamento, correspondendo a cinco profundidades em cinco cenários de altura de onda.

A análise simultânea das tabelas 6.10 a 6.14 e das figuras 6.8 e 6.9 permite ainda a constatação de mais alguns resultados importantes. Ao largo, a amplitude entre rumos consecutivos testados é de  $22.5^\circ$  e como seria de esperar, com a redução da profundidade, a refacção das ondas origina a redução das amplitudes entre rumos, aliás, visível nas figuras. Como valores indicativos, pode



referir-se que para a maior profundidade testada, as amplitudes entre rumos situam-se entre os  $10^\circ$  e os  $15^\circ$ , sendo maiores entre os rumos NW-WNW, WNW-W e W-WSW, por estes sofrerem menor efeito de refração. Para as menores profundidades as amplitudes entre rumos continuam a diminuir, chegando a valores de amplitude inferiores a  $5^\circ$  principalmente entre os rumos NNW-NW, WSW-SW e SW-SSW, em qualquer cenário de altura de onda.

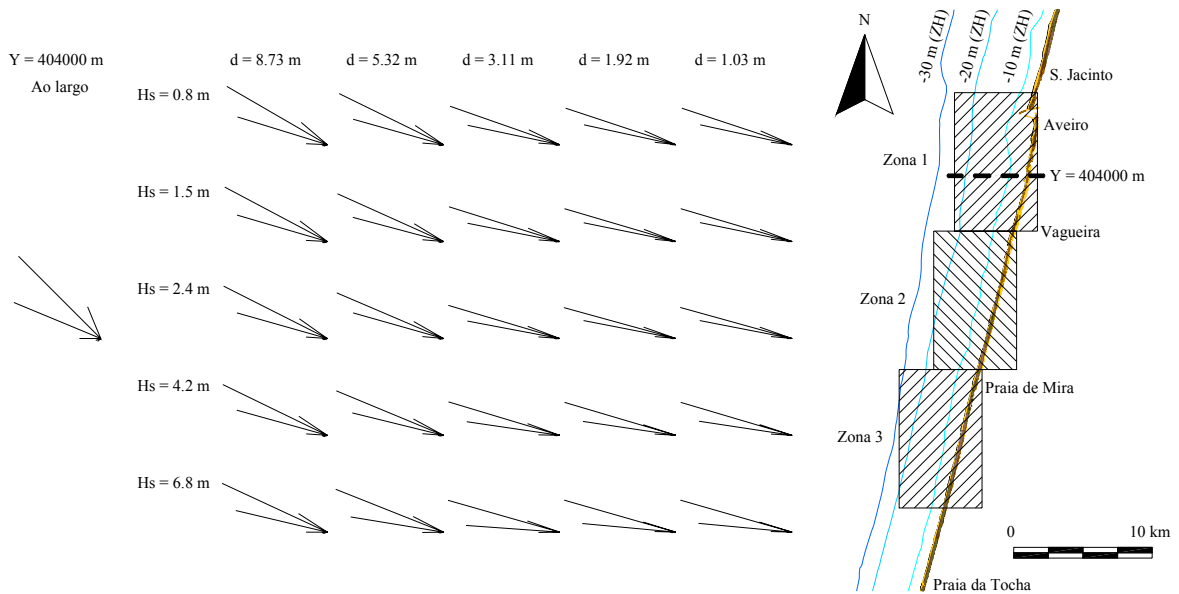


Figura 6.8: Rosas de rumos locais, durante a propagação das ondas até à costa. Representação em função das diferentes profundidades e para vários cenários de altura de onda (alinhamento em  $y = 404000$  m).

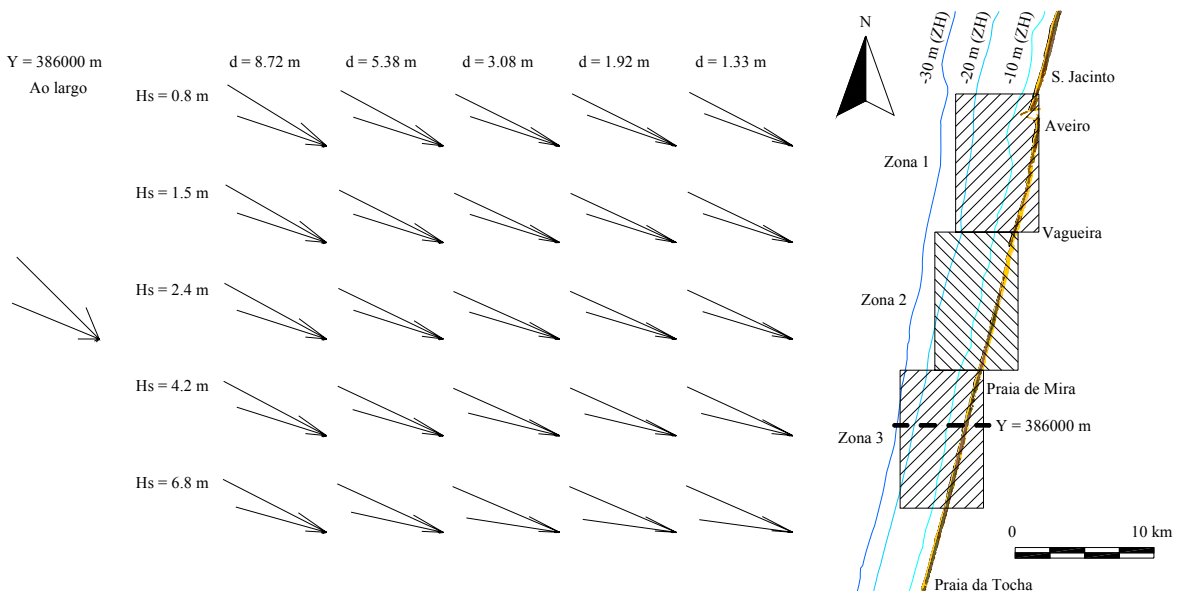


Figura 6.9: Rosas de rumos locais, durante a propagação das ondas até à costa. Representação em função das diferentes profundidades e para vários cenários de altura de onda (alinhamento em  $y = 386000$  m).

Comparando as características da onda ao largo com as características em baixas profundidades (cerca de 2 m), verificam-se rotações superiores a 60° para rumos SSW. Para 8.7 m de profundidade, a rotação deste rumo situa-se em mais de 40° nos casos de ondas mais altas (cuja influência dos fundos se inicia a maiores profundidades), sendo um pouco inferior a 40° nas ondas de 0.8 m e 1.5 m de altura significativa. Os rumos NNW e SW têm um comportamento semelhante, em termos de alterações de direcção, sendo cerca de 40° a rotação sofrida até a onda atingir as pequenas profundidades. Os rumos de WSW e NW sofrem cerca de 20° de rotação, enquanto os rumos W e WNW são os menos afectados na direcção ao longo da propagação da onda, sendo a rotação em geral inferior a 10°.

Em conclusão, como é evidente, a refacção altera os rumos de ondulação, pelo que as respectivas rosas de rumos, apesar de semelhantes, são únicas para cada ponto ao longo da costa. Para iguais condições de altura de onda e respectivo período ao largo, estas características são menores na rebentação, quanto mais afastado dos quadrantes W ou WNW for o rumo de proveniência da onda. O maior ângulo entre as curvas batimétricas e a crista da ondulação tem como consequência o fenómeno de refacção mais marcado, reduzindo também a altura de onda na zona de rebentação. Como esperado, da análise dos resultados pode concluir-se que a refacção faz convergir a direcção da ondulação na rebentação para valores próximos uns dos outros. O conhecimento do clima de agitação ao largo permite a projecção das características de agitação local, condicionada por diversos factores que influenciam a propagação da onda, nomeadamente a batimetria.

## **6.7 Dados Sobre a Granulometria dos Sedimentos**

Pureza e Araújo (1956) recolheram duas amostras compostas, cada uma resultante da mistura de quatro amostras simples, para diversas praias entre o Porto e a Figueira da Foz. Uma amostra foi colhida na região correspondente à plataforma de preia-mar da praia e a outra na zona de baixa-mar. Foram ensaiadas 50 g de cada amostra e os diâmetros médios obtidos para as praias do distrito de Aveiro, são apresentados no quadro seguinte.

Tabela 6.15: Diâmetro médio das areias, em praias do distrito de Aveiro (retirado de Pureza e Araújo, 1956).

Localidades	$d_{50}$ (mm)	
	Preia-mar	Baixa-mar
Praia da Costa Nova – cerca de 1.5 km a Sul do farol, do lado do mar	0.560	0.920
Praia do Furadouro	0.790	0.718
Barrinha de Esmoriz – 200 m a Oeste da capela da praia de Esmoriz	0.520	0.980
Praia de Cortegaça – entre a Barrinha de Esmoriz e o Furadouro	0.580	0.590

A principal conclusão que Pureza e Araújo (1956) retiram é que o diâmetro médio correspondente às zonas de preia-mar é, na generalidade, inferior aos de baixa-mar. Verifica-se também uma grande dispersão de valores.

Segundo Ferreira (1993), os sedimentos que recobrem a plataforma continental são, em geral, constituídos por areias finas com médias correspondentes na ordem dos 0.5 mm aos 0.125 mm. A análise da distribuição das médias granulométricas permite separar três ambientes distintos na plataforma: a zona de entre marés, a zona de barra imersa e a zona para o largo da barra. Junto da zona de marés, os sedimentos são mais grosseiros, sendo a quantidade de finos, de modo geral, insignificante, tendendo a haver mais finos para o largo.

Para definição da ordem de grandeza da dimensão das areias da zona costeira na região de Aveiro, Ferreira (1998) refere a amostragem efectuada em Dezembro de 1990 pelo Instituto Hidrográfico e pelo grupo DISEPLA como a única realizada com o intuito de caracterizar a praia submersa. A análise dos resultados dessa campanha indicam valores médios da granulometria de 0.3 mm a 0.4 mm, consoante a distância à linha de costa.

Os trabalhos de Pereira (2000), para caracterização da granulometria das areias recolhidas na zona entre marés de 10 estações localizadas entre a Costa Nova e Poço da Cruz, conduziram a dimensões dos sedimentos compreendidas entre os 0.063 mm e 2 mm (valores característicos das areias). Nessa campanha foram analisadas 112 amostras, existindo variação espacial e temporal nas recolhas e consequentemente nos resultados obtidos. Pereira (2000) refere que nesta zona de proximidade da praia, em períodos de maior agitação há um enriquecimento de sedimentos mais grosseiros e o diâmetro médio diminui quando a ondulação é mais fraca.

Para avaliar esta importante característica procedeu-se também à realização de ensaios da dimensão das areias recolhidas na zona entre marés ao longo do trecho da costa do distrito de Aveiro. Foram efectuadas cinco campanhas, num período correspondente a 16 meses. A primeira campanha decorreu em Fevereiro de 2003, procedendo-se à recolha de amostras em períodos de baixa-mar em 20 locais (oito entre Esmoriz e o Furadouro, no Norte do distrito de Aveiro e doze entre as praias da Barra e do Areão). A segunda campanha decorreu em Junho de 2003 e a terceira em Outubro de 2003. Em 2004 realizaram-se duas campanhas, uma em Fevereiro e outra em Junho, correspondendo a intervalos de quatro meses entre cada uma das campanhas efectuadas.

As amostras consistiram em quantidades retiradas da zona entre marés até uma profundidade de 15 cm a 20 cm. Destas quantidades foram ensaiadas apenas cerca de 200 g por amostra. As amostras foram secas em estufa por um período de cerca de 24 h a uma temperatura a rondar os 65 °C. Após a secagem, foi efectuada a peneiração das amostras em peneiros da série ASTM, com vibração durante cerca de 4 m.

A tabela 6.16 expressa os locais de recolha e os diâmetros médios obtidos. Os locais de recolha foram escolhidos em função das obras de protecção costeira existentes e das acessibilidades às praias. Devido a este factor, a distância entre os diversos pontos nem sempre é regular.



Figura 6.10: Diversas fases da operação de análise granulométrica das areias: recolhas das amostras, secagem em estufa, separação de grãos aglutinados, vibração, separação das quantidades em cada peneiro e respectiva pesagem.

Da análise da tabela 6.16 verifica-se a grande dispersão de resultados na dimensão das areias no distrito de Aveiro. Em termos de campanhas realizadas, a que menor dispersão de valores registou

foi a de Outubro de 2003, com os valores de  $d_{50}$  a oscilarem entre os 0.26 mm e os 0.65 mm. A que revelou maior irregularidade de resultados ao longo da costa foi a campanha de Junho de 2003, com os valores do diâmetro médio das amostras a variarem entre 0.29 mm e 3.14 mm. A média dos diâmetros médios dos 20 locais foi em Fevereiro de 2003 de 0.54 mm. Nas campanhas seguintes, a mesma média foi de 0.84 mm em Junho de 2003, 0.47 mm em Outubro de 2003, 0.60 mm em Fevereiro de 2004 e de 0.77 mm em Junho de 2004.

Tabela 6.16: Diâmetro médio das areias em 20 locais da região do distrito de Aveiro.

Amostra	Local de recolha	$d_{50}$ (mm)				
		02/03	06/03	10/03	02/04	06/04
1	A Norte do esporão Norte de Esmoriz	0.76	0.64	0.61	0.64	0.62
2	Em frente da escola primária de Cortegaça	0.40	0.62	0.47	0.62	0.58
3	A Norte do esporão Norte de Cortegaça	0.54	0.68	0.56	0.51	0.61
4	A Sul do esporão Sul de Cortegaça	0.37	0.53	0.37	0.36	0.39
5	Praia de São Pedro de Maceda	0.54	0.62	0.53	0.42	0.44
6	A Norte da frente urbana do Furadouro	0.66	0.81	0.64	0.71	0.75
7	A Norte do esporão Norte do Furadouro	0.80	1.30	0.62	0.68	0.75
8	Limite Sul da defesa aderente do Furadouro	0.45	0.59	0.63	0.51	0.69
9	Entre os quebramares central e Sul da barra	0.32	0.29	0.26	0.20	0.23
10	A Sul do quebramar Sul da barra	0.34	0.33	0.35	0.32	0.36
11	A Norte do esporão n.º 2 da Costa Nova	0.34	0.54	0.37	0.81	0.57
12	A Sul do esporão n.º 3 da Costa Nova	0.40	0.56	0.40	0.43	0.52
13	A Norte do esporão n.º 4 da Costa Nova	0.36	0.65	0.39	0.60	0.42
14	200 m a Sul do esporão n.º 5 da Costa Nova	0.32	0.35	0.39	0.49	0.58
15	Limite Norte da defesa aderente da Vagueira	1.87	0.74	0.60	0.74	0.89
16	A Norte do esporão Norte da Vagueira	0.38	1.86	0.65	0.79	0.61
17	Limite Sul da defesa frontal aderente da Vagueira	0.52	3.14	0.46	0.60	1.38
18	Cerca de 800 m a Sul do esporão Sul da Vagueira	0.62	1.30	0.40	1.53	2.88
19	Cerca de 200 m a Norte do novo esporão do Areão	0.42	0.70	0.38	0.66	1.74
20	A Sul do novo esporão do Areão	0.42	0.61	0.34	0.39	0.38

A maior uniformidade de resultados aconteceu a Sul do quebramar Sul da barra, onde os valores encontrados permanecem praticamente constantes no tempo. Quando o local de recolha das amostras se localiza a sotamar de uma obra de defesa, os registos apresentam maior uniformidade. Em geral, a região Norte, entre Esmoriz e Furadouro, regista menores variações de valores ao longo do tempo. Grandes variações foram encontradas na região da Vagueira, onde nas duas primeiras campanhas realizadas, bem como na campanha de Junho de 2004, se obtiveram resultados de areia de grandes dimensões.

O local com os valores mais baixos de diâmetros médios ao longo das cinco campanhas foi por quatro vezes entre os quebramares central e Sul da barra. Os valores mais altos foram registados sempre na zona da Vagueira, oscilando entre o limite Norte da defesa frontal aderente e 800 m a Sul do esporão Sul da Vagueira.

Interessa notar que a variação da dimensão das areias no tempo não seguiu a mesma relação nos diversos locais de recolha. Em alguns locais, foram obtidos os valores máximos em determinada data, enquanto noutros, nessa mesma data se obtinham os valores mínimos (o mês de Fevereiro de 2003 é o melhor exemplo desta situação, onde em três locais se obtiveram os valores mais altos do diâmetro médio, enquanto em seis dos locais se obtinha o valor mais baixo). No entanto, em onze locais de recolha, os máximos diâmetros médios de areias foram obtidos na campanha de Junho de 2003, justificando o maior valor médio global. Em Junho de 2004 foram registados cinco valores máximos, prenunciando maiores granulometrias nos períodos de Verão. Os valores mais baixos predominam nas campanhas de Fevereiro e Outubro de 2003 e Fevereiro de 2004. Em nenhum dos vinte locais de amostragem se registaram mínimos nos meses de Junho.

A figura 6.11 mostra a dispersão espacial e temporal dos resultados obtidos, bem superior aos 20% de incerteza na determinação da dimensão dos sedimentos referidos por Soulsby (1997). A zona desde a Barra até à Costa Nova (6 locais de recolha de amostras) apresenta alguma uniformidade de valores, principalmente em duas campanhas, com os diâmetros médios a oscilarem entre 0.32 mm e 0.40 mm (cerca de 25% de variação) e entre os 0.26 mm e os 0.40 mm (cerca de 50% de variação), respectivamente em Fevereiro e Outubro de 2003. Entre Esmoriz e o Furadouro os resultados variam entre 0.36 mm e 0.81 mm, ou seja, com mais de 100% de diferença, mesmo excluindo o registo de Junho, obtido a Norte do esporão Norte do Furadouro, com  $d_{50} = 1.30$  mm. As maiores dispersões são obtidas para Sul da Costa Nova, com variações ao longo do tempo superiores a 200% na generalidade dos pontos de amostragem.

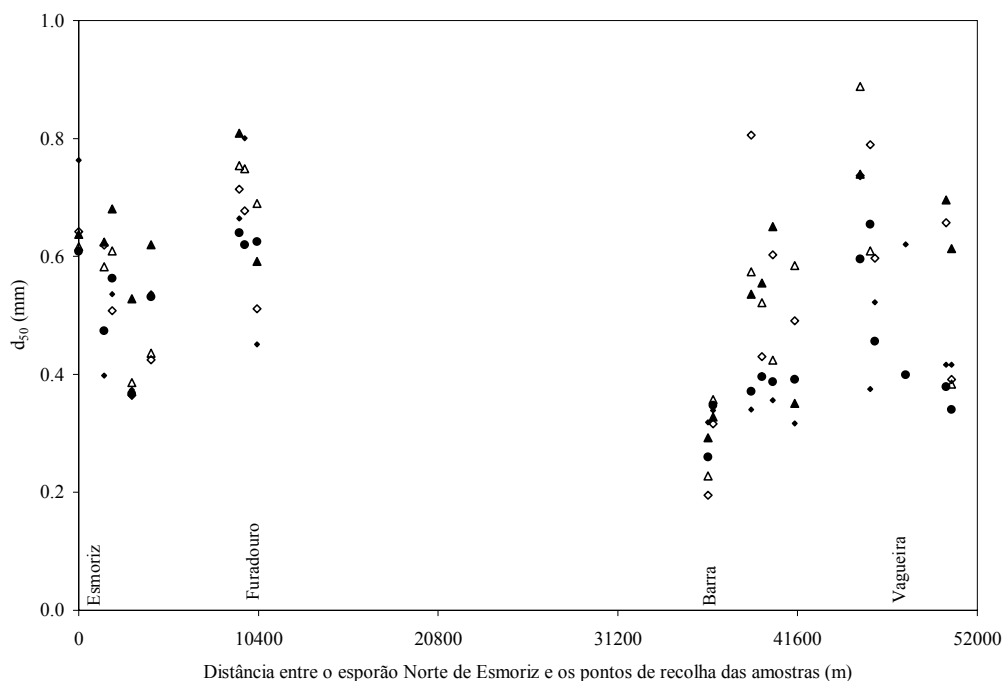
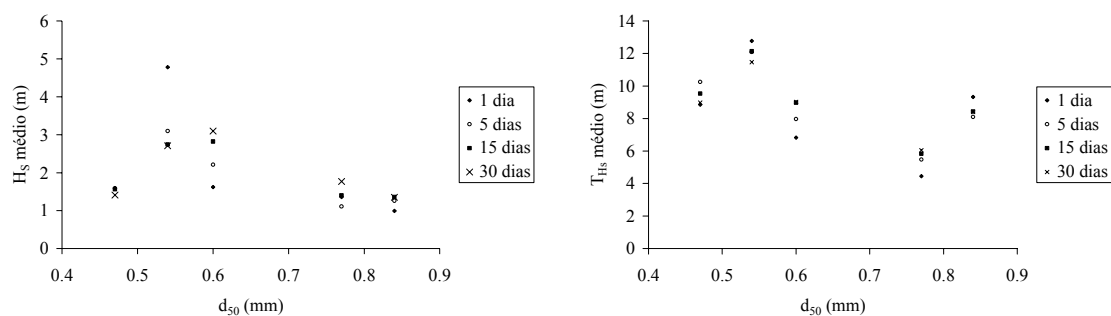


Figura 6.11: Distribuição do diâmetro médio das areias ao longo da costa, no distrito de Aveiro, em zona de baixa-mar, em diferentes alturas do ano.

Em trabalho realizado pela HP (1981a) é afirmado que desde Espinho até ao Cabo Mondego, a granulometria das areias do espraído se torna progressivamente mais grosseira à medida que se avança para Sul. Os resultados dos ensaios realizados não permitiram a confirmação dessa constatação, mas a extensão da zona de recolha de amostras limita-se a cerca de 50 km.

Tentou relacionar-se as características granulométricas encontradas com o clima de agitação que antecedeu os dias de recolha das amostras de areia. A figura 6.12 relaciona as características médias de agitação (alturas significativas e respectivos períodos de onda) com a média dos diâmetros médios dos 20 locais, em cada uma das cinco campanhas. Foi estudada a agitação média no dia anterior, cinco dias, quinze dias e trinta dias antes das campanhas realizadas.

Como se verifica, os resultados encontrados não demonstram nenhuma tendência de comportamentos. Não se consegue estabelecer nenhuma correlação entre o clima de agitação e a dimensão das areias, ao contrário do sugerido por Pereira (2000). Em oposição com o que seria de esperar, as maiores dimensões de areias foram obtidas para as menores alturas de onda.



a) Alturas de onda e diâmetros médios

b) Períodos de onda e diâmetros médios

Figura 6.12: Relação entre o clima de agitação marítima e a dimensão das areias.

Além da dimensão das areias, indica-se que os sedimentos na costa portuguesa são essencialmente de quartzo, pelo que se pode tomar como valor para a massa volúmica do material do fundo ( $\rho_s$ ) 2650 kg/m<sup>3</sup>. É referido em HP (1981a) que o índice de mineralização decresce claramente de Espinho para Sul. Não se efectuaram trabalhos para comprovar este facto.

## 6.8 Comportamento dos Perfis Transversais

Nesta secção pretende-se avaliar conceitos e o comportamento dos modelos relacionados com perfis transversais. Toda a análise desenvolvida refere-se aos perfis transversais apresentados nas figuras 6.13 a 6.15. Estas figuras representam secções transversais obtidas com base na batimetria da carta de pescas do Instituto Hidrográfico e na altimetria obtida no voo de 1996, de acordo com a figura 6.5. As secções estão espaçadas de 2000 m e incluem também a representação do perfil de equilíbrio com base na expressão 4.103, com  $m = 2/3$  e para  $d_{50} = 0.20$  mm e  $d_{50} = 0.50$  mm.

Assim, efectua-se a representação de perfis transversais de equilíbrio, comparando e constatando as previsíveis diferenças resultantes das diversas considerações adoptadas, bem como as semelhanças com as representações reais. Verifica-se também a dificuldade de quantificar a inclinação de uma praia e procede-se à aplicação da regra de Bruun na estimativa de recuos da linha de costa originada pela subida do nível médio das águas do mar.

A avaliação das características geométricas dos perfis foi baseada no nível médio das águas do mar, ou seja, a cota +2.0 m (ZH).



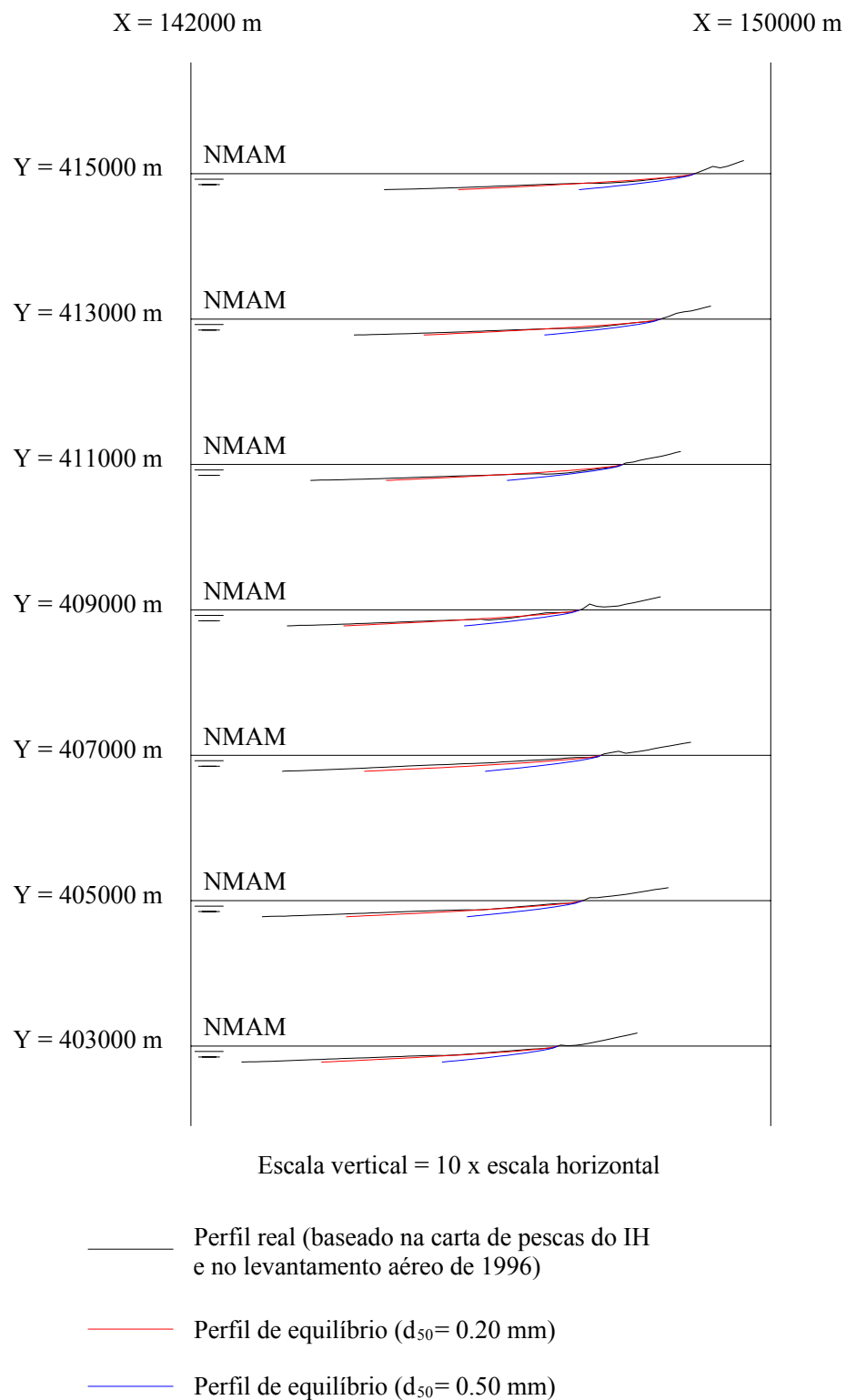


Figura 6.13: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos  $y = 415000$  m até  $y = 403000$  m).

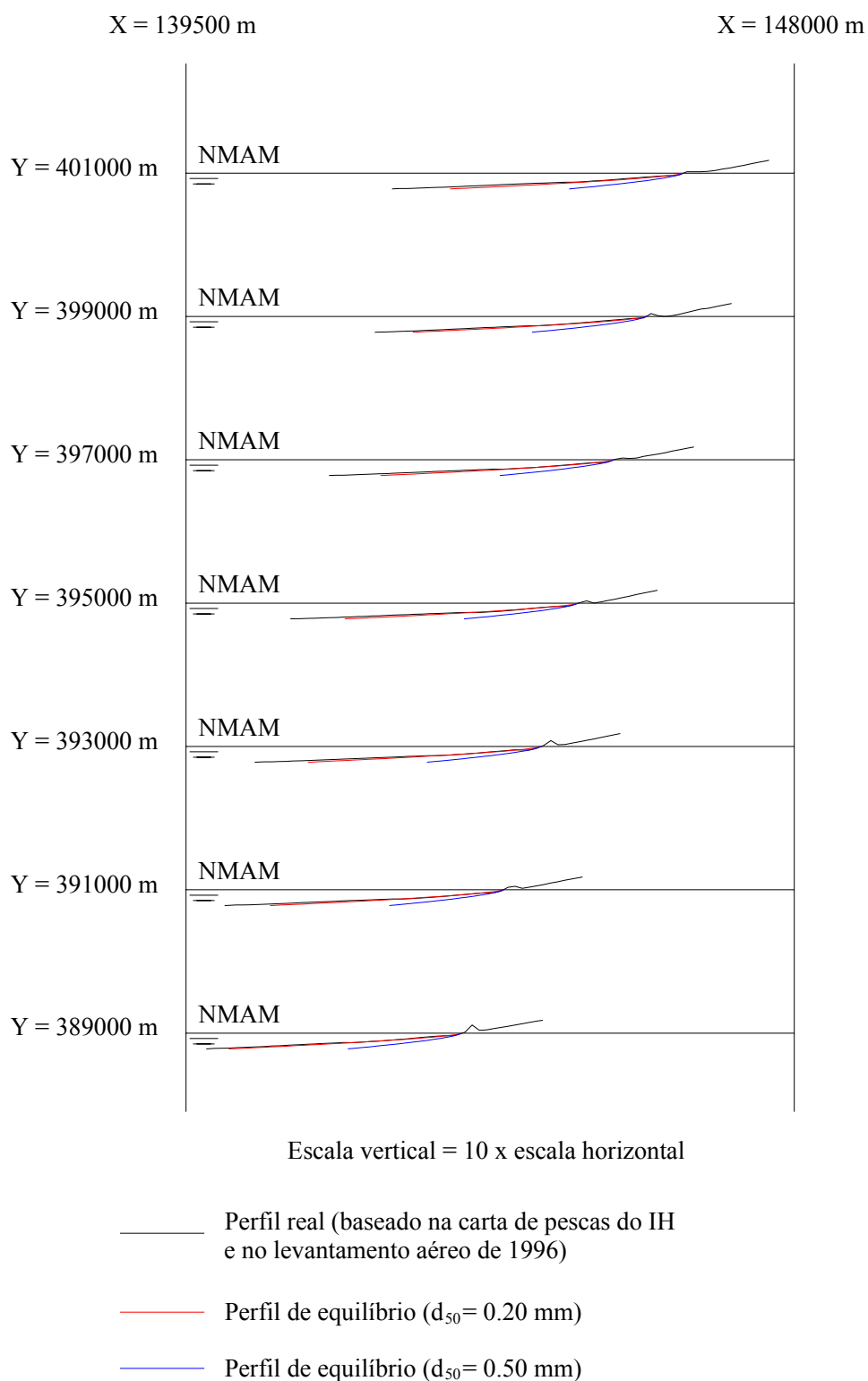


Figura 6.14: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos  $y = 401000$  m até  $y = 389000$  m).

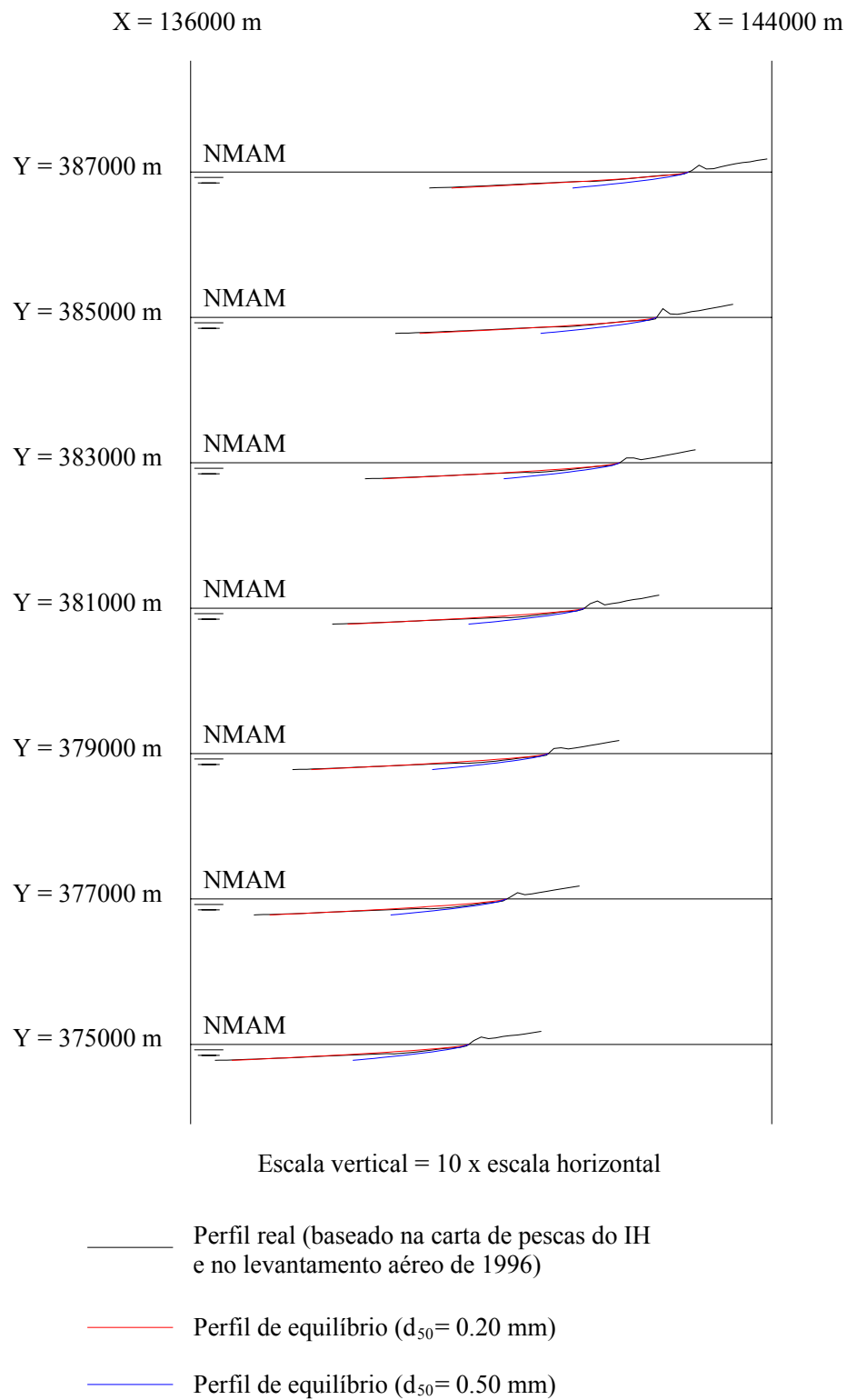


Figura 6.15: Cortes transversais na região de Aveiro (com base nas cartas de pescas do IH e na topografia resultante do levantamento aéreo de 1996), incluindo a representação de perfis transversais de equilíbrio (alinhamentos  $y = 387000$  m até  $y = 375000$  m).

Das figuras foram retiradas as características apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 6.17: Características geométricas de perfis transversais, baseados na região de Aveiro.

Secção y (m)	B (m)	$W_l$ (m)	$h_c = 12.1$ m			$h_c = 16.8$ m			$m$ (%)	
			$W_2$ (m)	$W$ (m)	$1.6 h_c/W_2$ (%)	$W_2$ (m)	$W$ (m)	$1.6 h_c/W_2$ (%)	0 - 4	2 - 6
415000	10.0	249	1051	1300	1.84	2618	2867	1.03	4.10	3.89
413000	10.0*	325*	991	1316	1.95	2525	2850	1.06	3.13	3.08
411000	6.0*	244*	823	1067	2.35	2556	2800	1.05	4.60	2.36
409000	8.0	138	1040	1178	1.86	2508	2646	1.07	3.60	5.32
407000	5.6	244	1996	2240	0.97	3096	3340	0.87	4.60	2.51
405000	4.0*	95*	1345	1440	1.44	2905	3000	0.93	3.35	4.19
403000	1.5	38	1402	1440	1.38	2862	2900	0.94	1.08	0.93
401000	1.9*	46*	1437	1483	1.35	2704	2750	0.99	2.05	0.88
399000	4.0	67	1383	1450	1.40	2513	2580	1.07	5.94	6.00
397000	2.4	117	1366	1483	1.42	2608	2725	1.03	2.66	1.05
395000	3.2	117	1216	1333	1.59	2603	2720	1.03	3.12	0.92
393000	8.2	134	1300	1434	1.49	2566	2700	1.05	4.22	5.51
391000	4.8	162	1258	1420	1.54	2558	2720	1.05	5.49	3.82
389000	11.4	138	1347	1485	1.44	2422	2560	1.11	3.84	6.14
387000	9.4	145	1198	1343	1.62	2335	2480	1.15	4.50	5.59
385000	12.0	86	1148	1234	1.69	2294	2380	1.17	13.64	13.98
383000	6.6	92	986	1078	1.96	2208	2300	1.22	4.64	7.19
381000	10.0	177	898	1075	2.16	2143	2320	1.25	6.98	7.89
379000	8.0	177	912	1089	2.12	2163	2340	1.24	9.09	9.09
377000	8.7	149	817	966	2.37	2126	2275	1.26	5.50	5.65
375000	10.0	171	895	1066	2.16	2129	2300	1.26	7.30	7.30

(\*) Nota - nestes perfis transversais, a berma não é perceptível, sendo considerada a cota e distância de transição do perfil para uma inclinação mais suave.

### 6.8.1 Inclinações da Praia

Para os perfis apresentados nas figuras 6.13 a 6.15, foi avaliado o ângulo do troço que une a intersecção dos perfis com as cotas 0.0 m (ZH) e +4.0 m (ZH) e também a intersecção com as cotas +2.0 m (ZH) e +6.0 m (ZH). As duas últimas colunas da tabela anterior correspondem ao declive desses troços.

Os resultados obtidos em cada um dos critérios de medição das inclinações não revelam nenhuma tendência de comportamento, pois por vezes o troço situado a cotas inferiores é mais inclinado e outras vezes sucede o contrário. A média obtida para as 21 secções em estudo, resultou idêntica em ambos os casos, sendo igual a uma inclinação de 4.92%. Em geral, estes resultados aproximam-se dos valores indicados como válidos para a região analisada (ver tabela 4.2).

A avaliação do comportamento das expressões apresentadas anteriormente (equações 4.98 a 4.100, apresentadas na secção 4.3.1) requer o conhecimento das características das ondas na rebentação. Para tal, foram utilizados os resultados obtidos por aplicação do programa SWAN para obtenção das características de ondas locais (considerando só os valores correspondentes a profundidades expectáveis de rebentação das ondas). Assim, em relação aos alinhamentos já apresentados e situados em  $y = 404000$  m e  $y = 386000$  m foram obtidas as alturas e períodos de onda ponderadas para um ano médio de agitação.

Tabela 6.18: Características da agitação na rebentação, por ponderação dos diferentes cenários de ondulação local, de acordo com os resultados do SWAN, para um ano típico de agitação.

Secção	$H_b$ (m)	$T_b$ (m)
$y = 404000$ m	1.52	7.48
$y = 386000$ m	1.64	7.76

Os resultados apresentados nesta tabela representam diferenças na altura de onda na rebentação de cerca de 7.5% e no período de onda em cerca de 3.7%, traduzindo as variações das características de agitação na rebentação ao longo da costa. Por curiosidade, refira-se que o levantamento aéreo em que se baseia a determinação das inclinações corresponde a voos realizados no final de Setembro de 1996 e início de Outubro de 1996 (concretamente, a 29/09/1996 e a 04/10/1996). Analisando a agitação marítima registada num período abrangente a estes voos (25/09/1996 a 04/10/1996), verificam-se valores de altura de onda significativa na bóia de Leixões a variar entre

os 1.3 m e os 3.6 m, com a média a ser de 2.1 m. Os respectivos períodos de onda variaram entre os 6.6 s e os 15.4 s, situando-se a média nos 10.0 s.

Com os elementos apresentados na tabela 6.18, que caracterizam as ondas na rebentação, a aplicação das expressões 4.98 a 4.100 torna-se simples e os resultados correspondentes são apresentados na tabela 6.19, para diferentes granulometrias de areias.

Tabela 6.19: Inclinações de praia obtidas com diferentes expressões (ver secção 4.3.1).

$d_{50}$ (mm)	$\omega_s$ (m/s)	$y = 404000$ m			$y = 386000$ m		
		(4.98)	(4.99)	(4.100)	(4.98)	(4.99)	(4.100)
0.2	0.020	2.06%	2.62%	4.73%	1.99%	2.52%	4.64%
0.5	0.066	3.26%	4.14%	8.57%	3.14%	3.98%	8.40%
0.8	0.098	4.13%	5.23%	10.41%	3.98%	5.03%	10.20%

Porque a altura de onda é inferior, os resultados na secção  $y = 404000$  m são ligeiramente superiores, não excedendo em 5% os valores do alinhamento mais a Sul. No entanto, a adopção de um valor válido de dimensão das areias é fundamental, podendo nesses casos a variação da inclinação duplicar.

Refere-se que as variações temporais e espaciais desta característica dificultam a adopção de um valor que caracterize toda a região num longo período de tempo. A normalização do critério de definição do declive da praia pode ajudar à uniformização de resultados.

### 6.8.2 Perfis de Equilíbrio

Uma das dificuldades encontradas na representação do perfil de equilíbrio refere-se desde logo à origem do referencial da equação 4.103, dependente do nível das águas do mar. Nas figuras 6.13 a 6.15, os perfis de equilíbrio referem-se ao nível médio das águas do mar.

Verifica-se que a granulometria altera significativamente a forma do perfil de equilíbrio. Apesar dos valores encontrados para a dimensão médias das areias na região representada por estes perfis transversais ser mais próxima de 0.5 mm, na realidade a representação obtida com a dimensão de 0.2 mm aproxima-se mais do perfil real. Este facto pode indiciar uma menor dimensão das areias

nas zonas submersas, já que as areias avaliadas correspondem a uma região de entre marés. Outra possibilidade será o facto do perfil poder não estar em equilíbrio. O expoente de  $m = 2/3$  poderá ainda não ser o mais adequado, abrindo um campo ainda mais lato de possíveis perfis de equilíbrio. Na prática, a aplicação da expressão é problemática, pois pode ainda ser referido o facto do diâmetro médio das partículas arenosas nas diversas secções ser variável e variar também na própria secção e no tempo. Assim, a caracterização de um perfil pela dimensão média dos sedimentos terá necessariamente que ser efectuada com muita cautela.

Para a escala de representação adoptada (onde não são perceptíveis as barras na proximidade da zona de rebentação das ondas), a aplicação do modelo com duas curvas apresentado na secção 4.3.3, não parece ser uma boa opção, mantendo as dificuldades do perfil de Dean e aumentando o número de parâmetros envolvidos.

A relação entre a profundidade activa e a respectiva largura é de fundamental importância em algumas aplicações (por exemplo a expressão de perfil de equilíbrio de Bodge) e naturalmente não é constante ao longo das profundidades. Como representado na tabela 6.17, a relação  $h_c/W_2$  no caso de se considerar a profundidade de Hallermeier ( $h_c = 16.8$  m) revela-se sempre inferior à mesma relação, mas obtida para a profundidade de Birkemeier ( $h_c = 12.1$  m). Para profundidades ainda menores, a relação  $h_c/W_2$  será em geral superior. Assim, com os valores da profundidade de fecho encontrados para a região analisada, em geral a condição 4.109, que compara a inclinação do perfil com as características geométricas do perfil activo, não é respeitada e portanto a representação da forma de equilíbrio de Bodge não é aplicável.

### 6.8.3 Estimativa do Recuo da Linha de Costa por Subida do Nível do Mar

Em Portugal, a regra de Bruun foi testada no litoral algarvio por Andrade em 1990 e no litoral Noroeste português por Ferreira, em 1993. As conclusões desses estudos indicaram que apenas 10% do processo erosivo (ou menos) pode ser atribuído à actividade de transgressão holocénica (subida do nível do mar). Os outros 90% deverão ter origem em causas mais imediatas e operantes a curto prazo, nomeadamente as que se relacionam com o esgotamento das fontes aluvionares ou de origem antrópica.

Para a determinação dos recuos de linha de costa ( $R$ ) por aplicação da expressão apresentada na secção 4.3.4, é necessário definir para cada corte transversal os valores da profundidade activa ( $h_c$ ),

da altura da berma ( $B$ ) e da largura do perfil activo ( $W$ ), representada na tabela 6.17 como a soma da largura emersa ( $W_1$ ) e da largura submersa do perfil ( $W_2$ ).

Tabela 6.20: Recuos da linha de costa, por aplicação da regra de Bruun, para diferentes cenários e dados de geometria de perfis transversais, baseados na região de Aveiro.

Secção	$h_c = 12.1$ m		$h_c = 16.8$ m	
$y$ (m)	$R_{0.15}$ (m)	$R_{0.50}$ (m)	$R_{0.15}$ (m)	$R_{0.50}$ (m)
415000	8.8	29.4	16.0	53.5
413000	8.9	29.8	16.0	53.2
411000	8.8	29.5	18.4	61.4
409000	8.8	29.3	16.0	53.3
407000	19.0	63.3	22.4	74.6
405000	13.4	44.7	21.6	72.1
403000	15.9	52.9	23.8	79.2
401000	15.9	53.0	22.1	73.5
399000	13.5	45.0	18.6	62.0
397000	15.3	51.1	21.3	71.0
395000	13.1	43.6	20.4	68.0
393000	10.6	35.3	16.2	54.0
391000	12.6	42.0	18.9	63.0
389000	9.5	31.6	13.6	45.4
387000	9.4	31.2	14.2	47.3
385000	7.7	25.6	12.4	41.3
383000	8.6	28.8	14.7	49.1
381000	7.3	24.3	13.0	43.3
379000	8.1	27.1	14.2	47.2
377000	7.0	23.2	13.4	44.6
375000	7.2	24.1	12.9	42.9



Foi aplicada a regra de Bruun (equação 4.116) às características geométricas indicadas na tabela 6.17, para cada secção, supondo dois cenários diferentes de subida do nível médio das águas do mar. Para as profundidades de fecho de 12.1 m e de 16.8 m e projectando uma subida do nível do mar de 15 cm e outra de 50 cm (possíveis horizontes a cerca de 100 anos), resultam os recuos da linha de costa indicados na tabela 6.20 e visíveis na representação gráfica da figura 6.16.

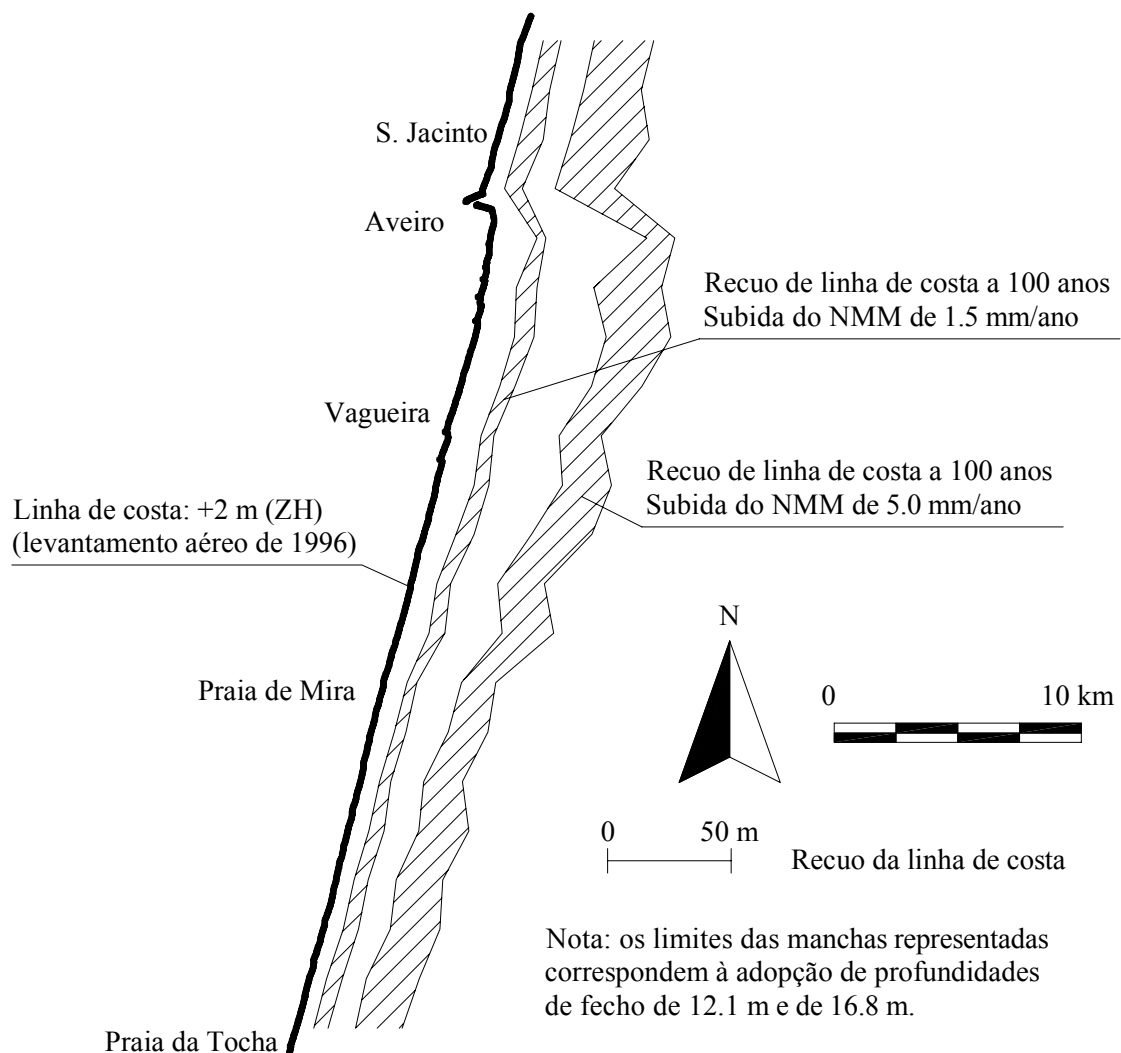


Figura 6.16: Recuo da linha de costa para uma subida do nível médio da água do mar num horizonte de 100 anos.

Considerando uma profundidade de fecho de 12.1 m e o cenário de subida de 15 cm em 100 anos, a aplicação da regra de Bruun às 21 secções representa resultados entre os 7.0 m e os 19.0 m de recuo, em função da geometria do perfil transversal. Aumentando a profundidade de fecho para os 16.8 m que resultam da aplicação da expressão de Hallermeier, os recuos registados também aumentam. O agravamento de erosão é significativamente variável em função das características

geométricas dos perfis e regista diferenças entre 17.8% e 108.3%. Em termos médios, as erosões calculadas para a maior profundidade de fecho são superiores em 62%.

Na figura são também visíveis os resultados dos recuos obtidos caso fosse considerado um cenário de subida de 5 mm/ano. Assim, neste cenário representam-se também os resultados para a profundidade activa que resulta da expressão de Birkemeier ( $h_c = 12.1$  m) e da expressão de Hallermeier ( $h_c = 16.8$  m). Na regra de Bruun existe proporcionalidade directa entre a subida do nível médio da água do mar e os recuos da linha de costa. O cenário de subida de 5 mm/ano é cerca de 230% mais desfavorável que o de subida de 1.5 mm/ano e traduz em todas as secções a mesma relação nos resultados de regressão da linha de costa.

Como se verifica, os valores obtidos para a taxa de recuo em 100 anos, admitindo uma subida média do nível do mar de 1.5 mm/ano, apesar de terem a sua importância, não serão significativos nas taxas de recuo que se registam actualmente nas praias da costa Oeste portuguesa. Admitindo um cenário mais gravoso, os 50 cm de subida em 100 anos, já representam recuos superiores (na ordem de 0.5 m/ano), mas ainda assim, pouco significativos para as taxas de recuo registadas actualmente em alguns dos locais representados pelos perfis transversais em análise.

## **6.9 Avaliação do Potencial de Transporte Sólido**

Para as diversas condições de agitação local ao longo do litoral, foram calculados os valores de potencial de transporte sedimentar longitudinal, de acordo com a fórmula CERC e a fórmula de Kamphuis. Assim, procedeu-se ao cálculo da capacidade de transporte anual para cada um dos 35 cenários de agitação apresentados na secção 6.5 e em seguida foi aplicada a ponderação proporcional a um ano com condições típicas de agitação, de acordo com a tabela 6.7. Esta aplicação permite o cálculo dos valores de transporte sedimentar esperados num ano médio. Durante tempestades ou num ano de agitação especialmente tempestuosa os resultados podem ser significativamente diferentes.

Na aplicação da fórmula CERC foi necessário avaliar apenas os valores da altura e direcção da onda na rebentação. Esta é a grande vantagem desta fórmula, já que a fórmula de Kamphuis também obriga à utilização do período de onda, inclinação da praia e dimensão das areias, introduzindo alguma incerteza na adopção dos valores representativos de cada variável. Assim, a

tabela 6.21 resume os resultados obtidos ao longo das diversas secções do litoral aveirense, onde se foram admitindo diferentes pressupostos na aplicação das referidas fórmulas.

Tabela 6.21: Volumes potenciais de transporte sólido longitudinal na região de Aveiro, considerados positivos no sentido Norte-Sul (milhões de m<sup>3</sup>/ano).

Secção	CERC ( $k = 0.39$ )		Kamphuis ( $\alpha_N$ fixo)			
			$m = 4.92\%$		$m$ variável	
	$y$ (m)	$\alpha_N$ fixo	$\alpha_N$ variável	$d_{50} = 0.2$ mm	$d_{50} = 0.5$ mm	$d_{50} = 0.2$ mm
410000	3.2	6.7	2.7	2.2	2.4	1.9
408000	-1.5	4.9	0.1	0.1	0.1	0.1
406000	-1.1	2.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4
404000	0.9	2.8	0.6	0.5	0.3	0.3
402000	3.8	3.2	2.3	1.8	1.0	0.8
400000	2.9	2.7	1.9	1.5	1.7	1.3
398000	1.0	1.7	0.7	0.6	0.6	0.5
396000	2.1	2.0	1.7	1.3	1.1	0.9
394000	5.9	5.7	2.9	2.3	2.3	1.8
392000	1.7	1.2	1.3	1.0	1.3	1.0
390000	4.8	4.0	2.8	2.2	2.6	2.1
388000	2.0	1.1	1.5	1.2	1.3	1.1
386000	3.2	3.4	2.3	1.9	3.7	2.9
384000	2.3	2.7	1.9	1.5	2.9	2.3
382000	3.4	4.1	2.3	1.9	2.6	2.1
380000	3.5	3.5	2.5	2.0	3.6	2.9
Média	2.4	3.3	1.7	1.3	1.7	1.3

A avaliação do ângulo da linha de costa com a direcção da ondulação é fundamental na estimativa dos valores de potencial de transporte.  $\alpha_N$  representa o ângulo descrito pela linha de costa com o Norte e é desde logo a primeira dificuldade a ultrapassar na aplicação das fórmulas. Na realidade, a costa não descreve uma linha recta que defina um ângulo exacto com a ondulação na rebentação e

por isso foram admitidas duas situações. O valor fixo de  $\alpha_N$ , representando a direcção aproximada de toda a extensão analisada, ou um valor apropriado às proximidades da secção em análise. Esta situação é particularmente importante, por exemplo, na proximidade Sul do porto de Aveiro, onde a linha de costa se aproxima mais da orientação Norte-Sul e por isso, a capacidade potencial de transporte calculada para um ângulo comum a toda a extensão diminui significativamente.

Na aplicação da fórmula de Kamphuis não se efectua nenhuma comparação entre ângulos da linha de costa, por existirem outras variáveis de avaliação importante, o que conduziria a um número demasiado elevado de conjugações possíveis. Na estimativa do transporte longitudinal é avaliada a sensibilidade de alguns parâmetros, tais como o declive da praia ( $m$ ) e a granulometria das areias ( $d_{50}$ ). Proceda-se apenas à distinção de quatro situações que resultam da comparação entre o valor da média da inclinação das secções adjacentes apresentadas na tabela 6.17, para as cotas 0.0 m (ZH) a +4.0 m (ZH) ou a média das inclinações obtidas para todas as secções, igual a 4.92%, conjugadas com o diâmetro médio admitido para a dimensão dos sedimentos, testando as dimensões de 0.2 mm e de 0.5 mm.

Em termos médios, os resultados encontrados variam entre  $1.3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano e  $3.3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, representando um intervalo alargado de valores, mas englobando as taxas de transporte longitudinal apontadas na secção 6.3.1. Ao longo das diversas secções, os valores da fórmula CERC calculados para o ângulo da linha de costa constante, excedem a média dos resultados de Kamphuis entre 1.1 e 2.6 vezes. Estes aspectos revelam a incerteza associada a este tipo de cálculos.

A análise da figura 6.17, em conjunto com a tabela 6.21 permite verificar que o facto de se considerar um valor diferente do ângulo da linha de costa ( $\alpha_N$ ) para cada uma das secções, aumenta em geral os volumes em transporte, principalmente na zona onde a linha de costa mais se afasta do ângulo fixo adoptado. Este facto ocorre precisamente por o ângulo ser menor que a média considerada. Na região mais a Sul, porque os ângulos adoptados para cada secção se aproximam do ângulo fixo considerado, os valores obtidos são semelhantes. Nas duas aplicações da fórmula CERC, o coeficiente de proporcionalidade ( $k$ ) considerado foi de 0.39.

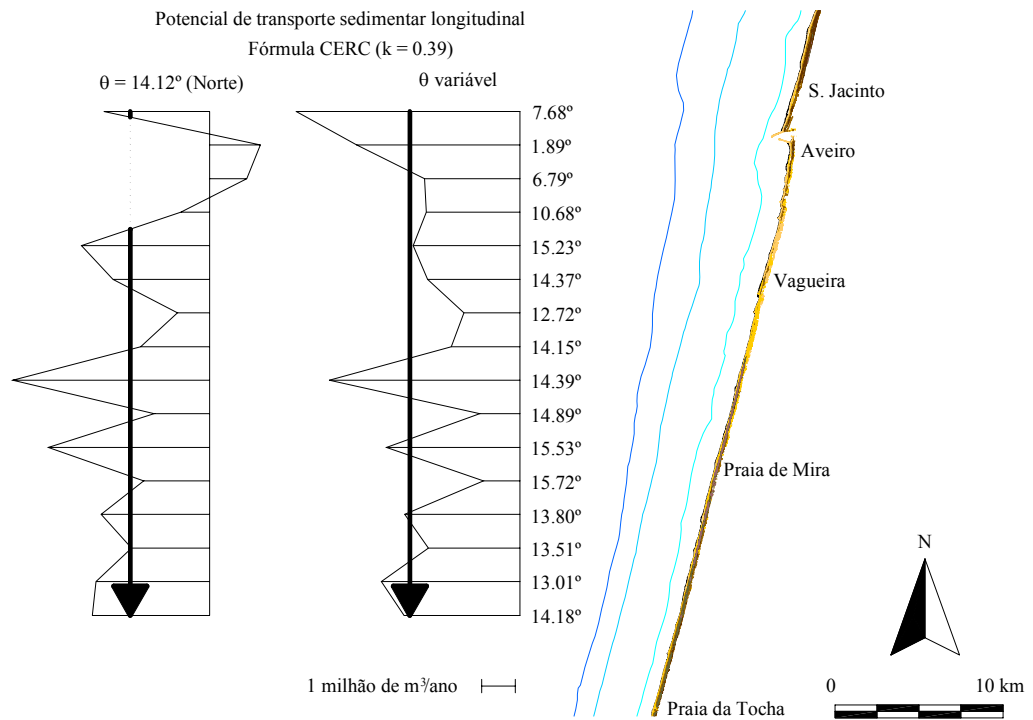


Figura 6.17: Potencial de transporte sólido longitudinal, obtido por aplicação da fórmula CERC.

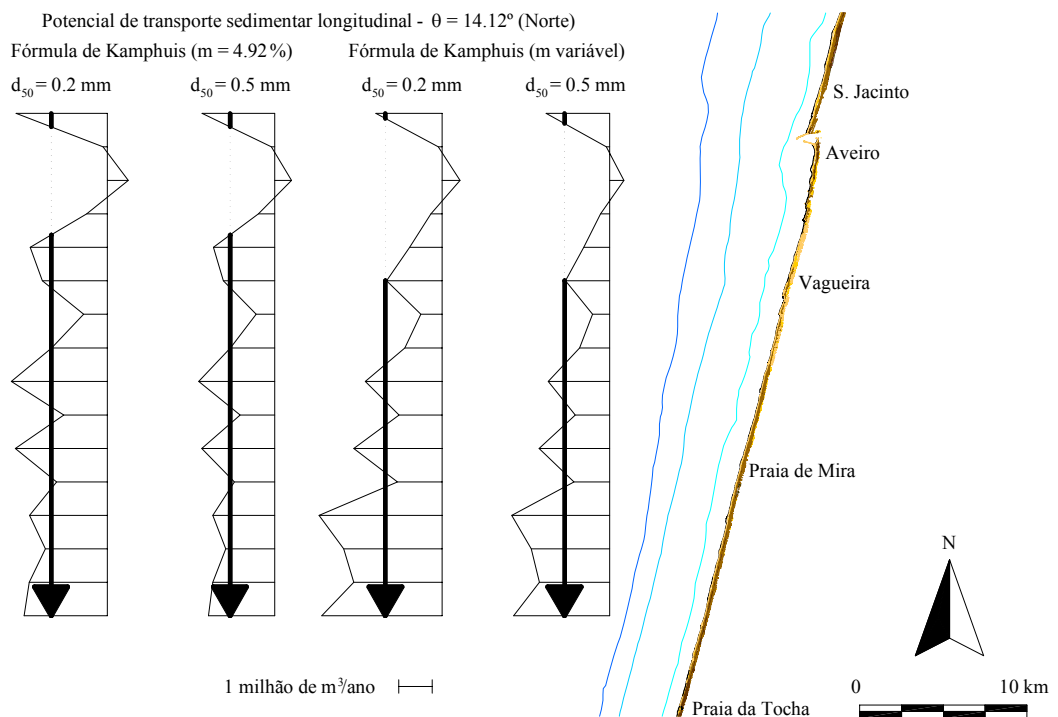


Figura 6.18: Potencial de transporte sólido longitudinal, obtido por aplicação da fórmula de Kamphuis.

Na fórmula de Kamphuis (equação 4.127), o facto de se aumentar a dimensão dos sedimentos reduz os volumes em transporte. Para as situações analisadas, correspondentes ao diâmetro médio que se aproxima dos perfis de equilíbrio ( $d_{50} = 0.2$  mm) e ao valor que se aproxima do resultado das amostragens realizadas ( $d_{50} = 0.5$  mm), os volumes reduzem cerca de 25%. De acordo com a expressão de Kamphuis, quanto menor for a inclinação considerada para a praia, menor será o volume de sedimentos em transporte. Este facto é particularmente visível na secção  $y = 402000$  m, onde a diferente consideração da inclinação da praia altera o resultado em mais de 100%. Em termos médios, as alterações nas diversas secções são na ordem dos 20%.

Em termos gerais, e como seria esperado, quando a ondulação é proveniente do quadrante Noroeste, o transporte longitudinal resulta no sentido Norte-Sul. A ondulação proveniente de Oeste ou do quadrante Sudoeste (menos frequente) conduz a transporte sólido de Sul para Norte. Os potenciais volumes de transporte sedimentar situam-se maioritariamente entre 1 e 4 milhões de metros cúbicos por ano médio de agitação (tabela 6.21). Estes valores correspondem a potencial líquido de transporte, sendo que o transporte bruto é superior, com valores de transporte em ambas as direcções (Norte-Sul e Sul-Norte).

Numa análise detalhada do efeito de cada cenário de agitação e respectiva capacidade de transporte, pode referir-se que o fenómeno de refacção mais acentuado que ocorre nas ondas provenientes dos quadrantes extremos reduz a altura de onda e consequentemente o potencial da capacidade de transporte. No entanto, o maior ângulo da crista das ondas com a linha de costa aumenta o potencial de transporte. Estes dois fenómenos sobrepõem-se com efeitos contrários, originando tendências pouco nítidas nos resultados globais.

Como foi visto, o ângulo considerado para a linha de costa é importante para a definição do potencial de transporte. Esta importância é mais significativa quando as ondas são de menor dimensão e vai diminuindo com o aumento da altura de onda. Este facto deve-se ao expoente associado à altura de onda nas expressões de determinação do potencial de transporte, traduzindo-se numa importância crescente, com consequente redução da importância do ângulo. O significado do ângulo é também mais sensível às ondas provenientes de rumos próximos da orientação da linha de costa. A função seno varia mais rapidamente para valores próximos de 0. Portanto, as ondas menores com proveniências de W ou WNW originam diferenças de resultados próximas de 100% para ângulos de linha de costa com diferenças na ordem dos 10%. Note-se no entanto que o potencial de transporte destas ondas é relativamente baixo, com consequente redução dos erros num cálculo global anual.

As quantias superiores de potencial de transporte sedimentar foram obtidas para as ondas de 6.8 m de altura, mas que têm uma frequência de ocorrência bastante baixa. As ondas de 0.8 m de altura significativa não têm capacidade de transporte relevante no resultado final. Assim, as situações de transporte mais importantes relacionam-se com as ondas de 1.5 m, 2.4 m e 4.2 m, com volumes indicativos de cerca de 1 milhão, 10 milhões e 25 a 50 milhões de metros cúbicos respectivamente, se ocorressem durante todo o ano. Para estas ondas, os volumes superiores são obtidos para rumos de SSW, mas como este rumo é pouco frequente em anos típicos, a principal direcção de transporte sólido longitudinal é de Norte para Sul (Coelho e Veloso-Gomes, 2003).

### **6.10 Aplicação dos Modelos de Linha de Costa a Sul da Barra de Aveiro**

Como escrevem Moreno e Kraus (1999), poucas verificações quantitativas das formas vulgarmente admitidas para a linha de costa têm sido realizadas. Por esse motivo, os modelos de configuração da linha de costa atrás apresentados (secção 5.1) foram também aplicados à situação concreta da costa litoral portuguesa na região de Aveiro.

Os dados da linha de costa utilizados na comparação dos modelos foram retirados dos registos existentes do levantamento aéreo realizado em 1996. Na generalidade das situações testadas o equilíbrio estático da costa ainda não foi atingido. Adicionado a este facto surgem dificuldades relacionadas com a determinação da posição do centro de difracção, da posição do ponto de sotamar correspondente à tangente da linha de costa com a direcção da agitação e da definição do rumo de agitação dominante. Estas questões deixam grandes dúvidas na aplicação dos modelos.

Para efectuar a representação das curvas espirais em planta, o procedimento adoptado foi na tentativa de encontrar um rumo da agitação incidente capaz de originar uma configuração próxima da configuração da linha de costa. Na tabela 6.7 verifica-se que a agitação dominante na costa ocidental portuguesa é proveniente dos quadrantes NW e WNW, indiciando uma gama de resultados prováveis. Os rumos da agitação incidente encontrados na aplicação dos modelos em espiral parabólica e em espiral polinomial (ver as figuras 6.19 a 6.23) são aceitáveis. Pelo contrário, os rumos obtidos para as configurações em espiral logarítmica são desajustados da realidade de rumos sentidos na costa Oeste portuguesa.

A verificação dos diversos modelos consistiu no teste de curvas em função do ângulo formado pelas cristas de agitação dominante com a costa, com diferença de 5° entre cada rumo, até se

constatar qual o melhor ajuste para cada modelo. Os principais parâmetros intervenientes nas diversas situações experimentadas estão resumidos na tabela 6.22. A linha de referência utilizada nos diferentes referenciais é definida pelo seu comprimento ( $R_0$ ) e orientação em relação ao Norte ( $\alpha_L$ ). Os ângulos  $\alpha_L$  apresentados, são positivos quando a linha de referência tem a orientação NW-SE. Foram testados os modelos em forma de espiral logarítmica (E Log), espiral parabólica (E Par) e espiral polinomial (E Pol). Em todos os casos, o ângulo  $\beta$  corresponde ao ângulo entre a crista da onda dominante e a linha de referência.

Numa primeira análise realça-se o facto da variação do ângulo  $\beta$  no modelo de espiral logarítmica originar resultados de comprimento do raio da curva espiral contrários à evolução registada nos modelos de espiral parabólica e de espiral polinomial. Na curva espiral logarítmica, o aumento do ângulo de incidência da agitação conduz a uma redução na dimensão dos raios da espiral, enquanto nas outras curvas, o aumento do ângulo de incidência da agitação aumenta também o valor dos raios da espiral, devido à relação de proporcionalidade directa entre estas duas grandezas.

Tabela 6.22: Principais parâmetros intervenientes na modelação da configuração de linha de costa em forma de espiral, adoptados para diversos trechos da costa de Aveiro.

Trecho	Linha de referência		E Log		E Par		E Pol		
	$R_0$ (m)	$\alpha_L$ (°)	$\beta$ (°)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$\beta$ (°)	$C_0$	$C_1$	$C_2$
QN-E1	1963	28.95	33.95	51.61	43.95	43.95	-0.07	1.51	-0.46
QN-E2	2784	17.20	52.20	43.37	27.20	27.20	0.05	1.14	-0.16
QS-E1	1645	18.31	58.31	41.37	28.31	28.31	0.04	1.16	-0.18
QS-E2	2533	8.85	78.85	34.16	13.85	18.85	0.05	1.03	-0.07
E2-E3	483	-5.11	79.89	33.69	9.89	14.89	0.04	1.01	-0.04
E3-E4	739	-8.37	76.63	35.12	11.63	11.63	0.03	1.00	-0.03
E4-E5	967	-6.79	83.21	32.08	8.21	8.21	0.00	1.01	-0.04
EN-ES	1147	-9.81	80.19	33.56	10.19	10.19	0.02	1.01	-0.03
E5-EN	4630	-14.66	-	-	1.34	2.34	-0.06	1.07	-0.08
ES-EA	2977	-11.94	-	-	2.06	3.06	-0.05	1.06	-0.07



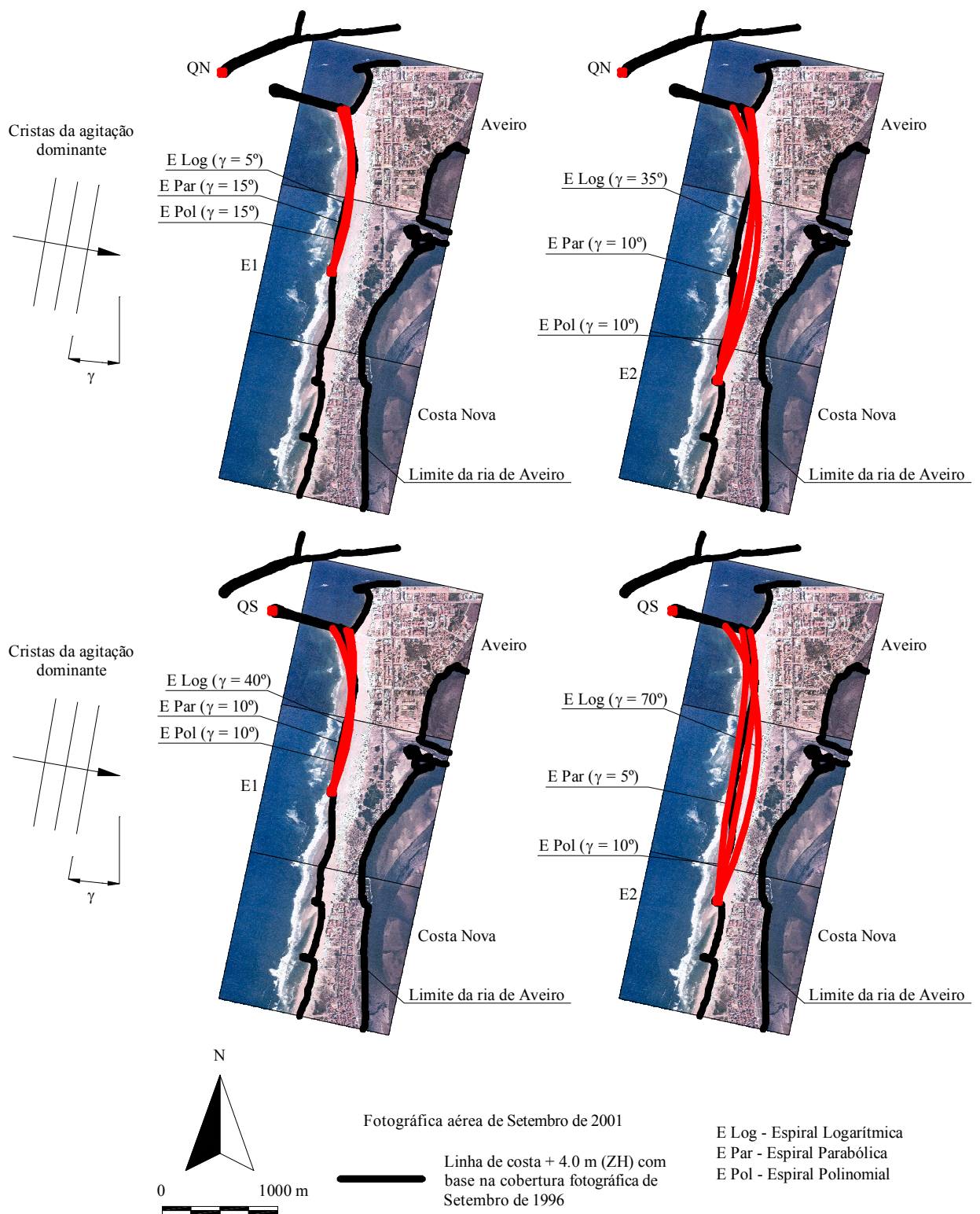


Figura 6.19: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa a Sul da barra de Aveiro, função de diferentes pontos limite.

O primeiro trecho a ser analisado foi o definido entre a Barra e a Costa Nova, imediatamente a Sul dos quebramares do porto de Aveiro, onde as fontes de sedimentos são praticamente nulas. Na incerteza da posição do centro de difracção das ondas, foram adoptadas duas hipóteses, coincidindo com a cabeça dos quebramares Norte e Sul da barra de Aveiro, aqui designados respectivamente como pontos QN e QS. A posição do ponto extremo de sotamar é também de difícil definição e como tal, adoptaram-se igualmente dois pontos (E1 e E2), respectivamente correspondentes a pontos próximos do esporão n.º 1 da Costa Nova (a ser abandonado) e do esporão n.º 2 da Costa Nova. Foram testadas diversas configurações em função destes pontos (figura 6.19).

Para qualquer dos modelos, os melhores resultados foram obtidos com o referencial QN-E1, verificando-se erros médios no comprimento do raio da espiral em relação à linha de costa na ordem dos 20 m a 40 m. O ângulo de agitação incidente que melhor ajustou a forma da linha de costa foi semelhante nos três modelos, registando 10º de diferença entre a solução no modelo de espiral logarítmica e a solução nos outros dois modelos.

Adoptando o ponto E2 para limite de sotamar do referencial e porque a linha de costa apresenta uma perturbação na proximidade do esporão n.º 1, os ajustes são piores em termos médios. Nestes, também se conseguem melhores resultados com o centro de difracção em QN do que em QS.

Não está prevista a reconstrução do esporão n.º 1, repondo as condições (nomeadamente comprimento) que já teve inicialmente, pois a praia actualmente apresenta-se robusta na zona do esporão, quer a montante, quer a jusante, e portanto, não se justifica uma intervenção que possa implicar alterações indesejáveis. Em todo o caso, se este esporão ficar completamente destruído ou vier a ser removido, será o esporão n.º 2 a funcionar como ponto “fixo” a sotamar, mais próximo do quebramar. Para esta hipótese, há uma grande disparidade em relação a configurações de estabilidade nesse troço adoptando diferentes curvas e ângulos de incidência de agitação. Significa que é maior a incerteza quanto ao futuro da configuração da linha de costa nessa zona, mas que haverá uma maior probabilidade de uma configuração de equilíbrio corresponder a um maior recuo (para o interior) comparativamente à situação de ponto “fixo” no esporão n.º 1, bem como maior probabilidade de se atingir uma ruptura que se possa propagar até ao limite da ria de Aveiro.

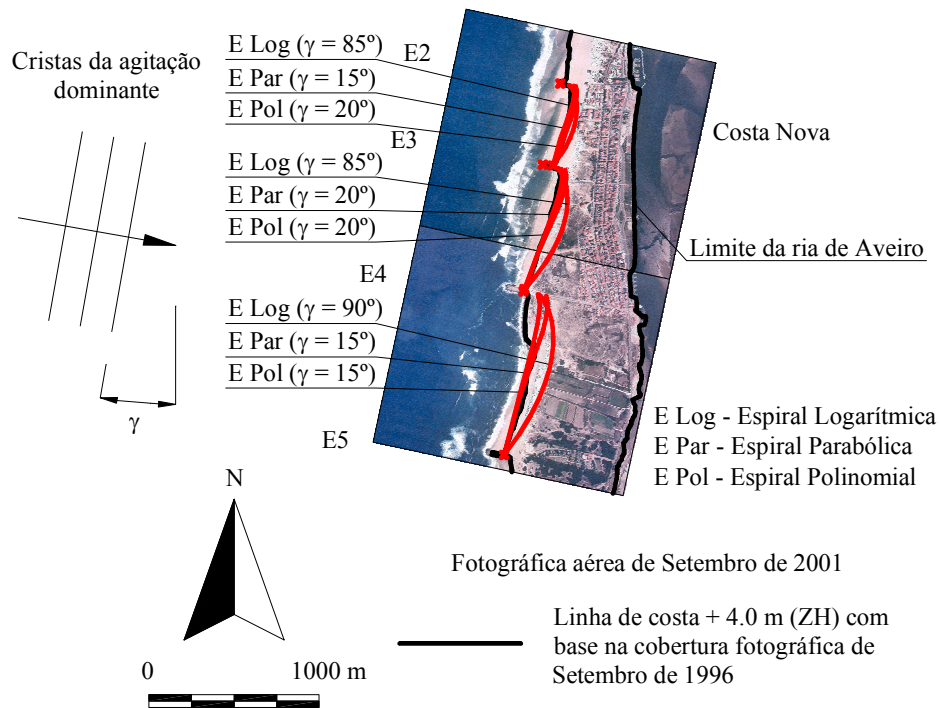


Figura 6.20: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre esporões da Costa Nova.

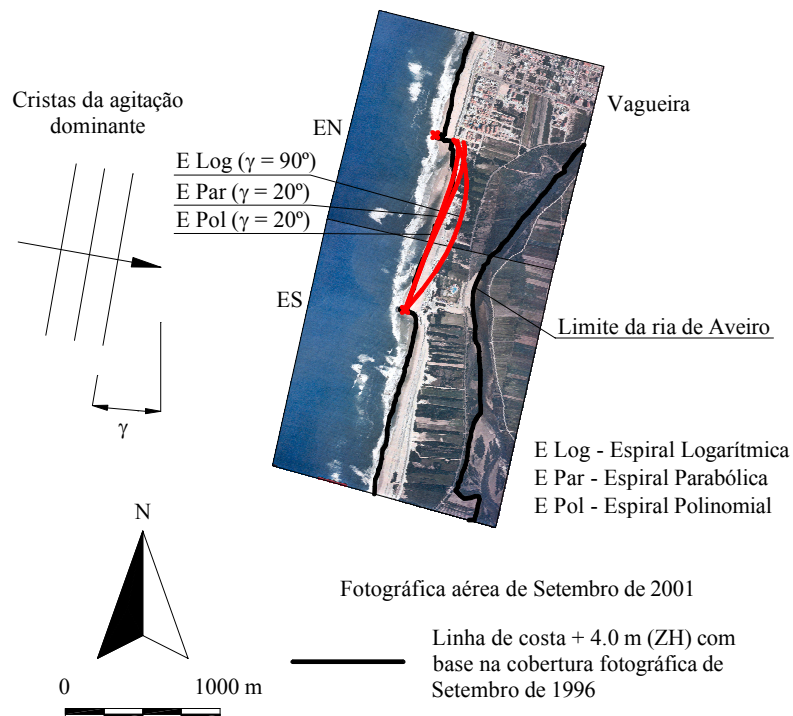


Figura 6.21: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre esporões da Vagueira.

De seguida analisaram-se os troços entre esporões, situados a Sul do esporão n.º 2 da Costa Nova. Em situação de comportamento semelhantes ficaram assim quatro troços (três na Costa Nova e um entre os esporões da Vagueira, como se visualiza na figura 6.20 e figura 6.21, onde o ponto de difracção considerado para origem do referencial das espirais foi a cabeça dos esporões de barlamar e o ponto extremo de jusante foi o enraizamento do esporão de sotamar.

O comprimento das linhas de controlo nestes casos variou entre os cerca de 500 m até pouco acima dos 1100 m. O reposicionamento do esporão n.º 2 (E2) mais a montante permitiria aproximar o espaçamento entre esporões. No entanto, a zona crítica com menor largura de restinga verifica-se imediatamente a montante do esporão, pelo que se espera assim o acumular de sedimentos nesta zona, sem ruptura da restinga.

Entre os esporões n.º 3 e n.º 4 (trecho E3-E4) evidencia-se que a obra de defesa aderente tem mantido a posição da linha de costa. Face à existência do aglomerado urbano, esta defesa aderente e a duna artificial criada funcionam como barreira de defesa. O mesmo comportamento regista-se no trecho EN-ES, entre os esporões Norte e Sul da Vagueira, onde a obra de defesa longitudinal aderente protege a frente urbana. Nestes casos a configuração em forma de espiral logarítmica é a que mais se afasta da linha de costa existente.

Na zona a sotamar do esporão n.º 4 (E4) existe também uma obra de defesa longitudinal aderente. As linhas de configuração obtidas pelos diversos modelos mostram precisamente que a zona da obra aderente está no interior da configuração de equilíbrio. Esta situação é confirmada na realidade, já que se verificam frequentes galgamentos, acumulados com uma instabilização dos fundos, com reflexo na própria estabilidade da obra aderente.

Por fim apresentam-se nas figuras seguintes os resultados obtidos para dois troços de maior extensão, onde o modelo de espiral logarítmica deixa de ter sentido. De facto, o modelo de espiral logarítmica só regista bons resultados nas zonas de sombra dos obstáculos e portanto passaria a ser lógica a aplicação de um trecho rectilíneo do tipo do exposto na secção 5.1.5. A extensão desse trecho é de difícil determinação, pelo que se expõem apenas os resultados das curvas parabólica e polinomial.

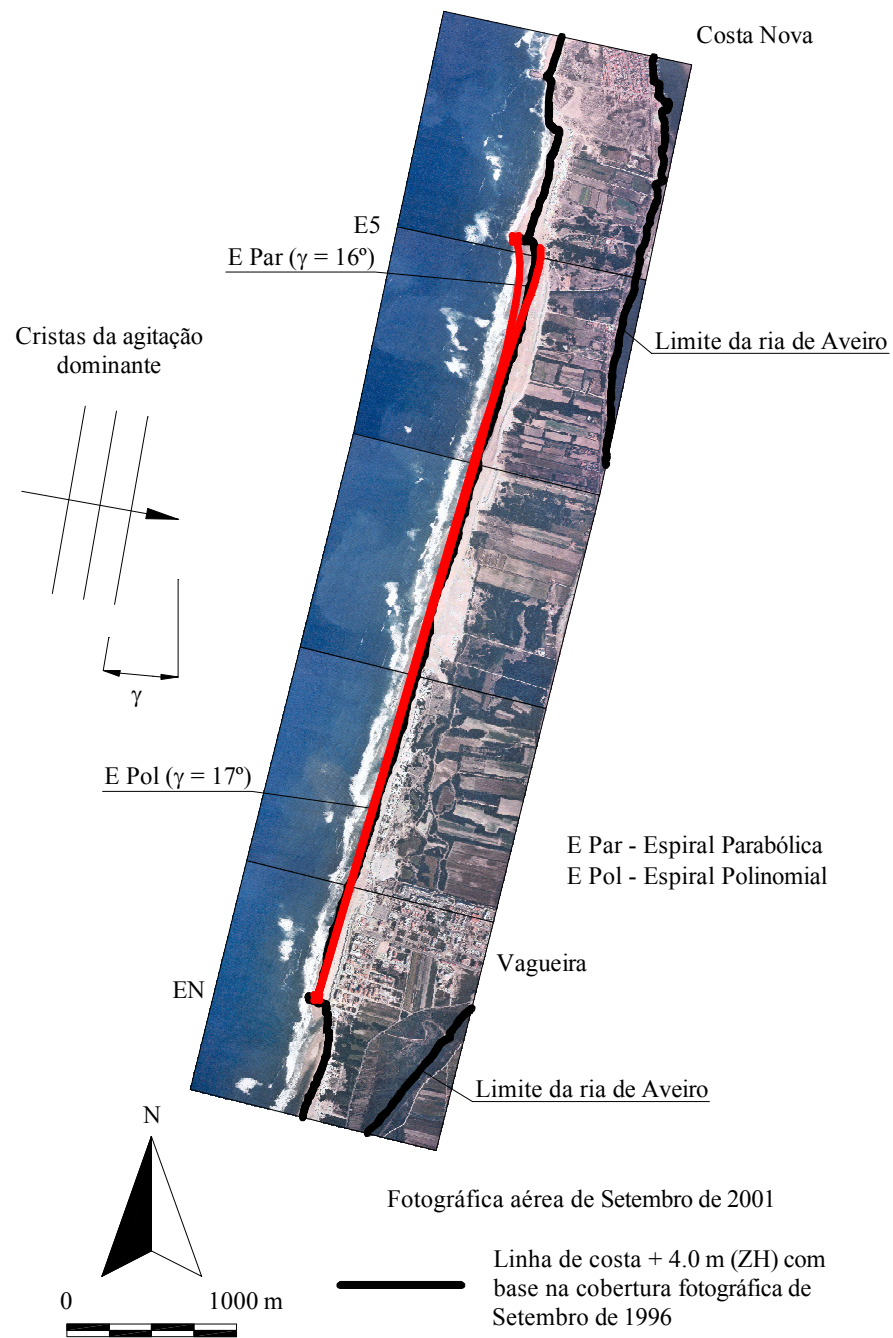


Figura 6.22: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre a Costa Nova e a Vagueira.

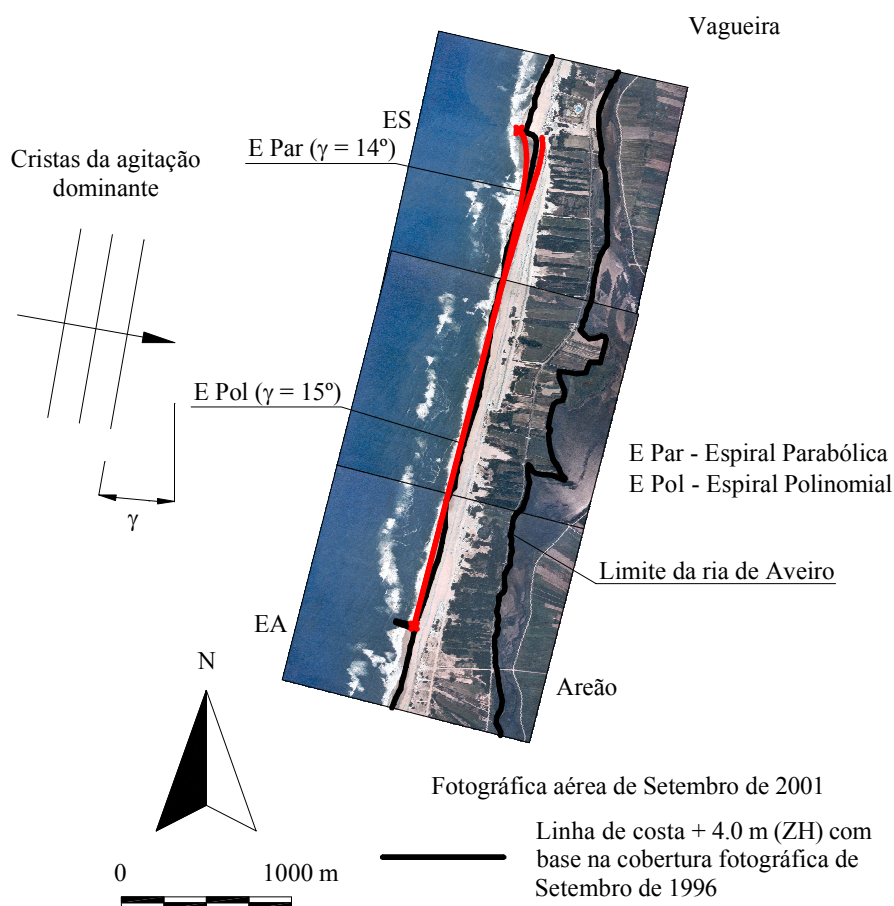


Figura 6.23: Aplicação dos modelos de configuração da linha de costa entre a Vagueira e o Areão.

Para estes modelos, os valores do ângulo  $\beta$  que melhor aproximam as curvas à situação da linha de costa actual são próximos de zero. Este facto poderá revelar que a linha de costa se encontra já próximo de uma situação de equilíbrio. Devido à extensão dos trechos, a variação dos ângulos da agitação dominante provoca diferenças mais significativas, pelo que os testes efectuados diferiram de um grau entre tentativas. Para o trecho entre o esporão n.º 5 da Costa Nova (E5) e o esporão Norte da Vagueira (EN), bem como para o trecho entre o esporão Sul da Vagueira (ES) e o esporão do Areão (EA), a orientação da agitação dominante corresponde a um ângulo ligeiramente superior no caso da curva em forma de espiral polinomial.

### 6.11 Aplicações do Modelo LTC

Depois da análise crítica de diversos modelos e comportamentos dos fenómenos costeiros e suas características particulares, tentou proceder-se à aplicação do modelo LTC à costa portuguesa, na



região de Aveiro. Para tal, foi necessária a calibração dos resultados à região através de diversas aplicações. Os testes foram efectuados com um clima de agitação que respeita um ano médio de agitação na costa Oeste portuguesa, de acordo com a tabela 6.7. Para controlo de resultados, foram escolhidos os volumes de sedimentos em transporte e as taxas de recuo da linha de costa. Inicialmente foram considerados os quebra-mares do porto de Aveiro e nenhuma outra obra de defesa. A região estudada corresponde à área representada na figura 6.6.

A existência de volumes sedimentares em transporte nas fronteiras da região modelada dificulta significativamente a calibração dos resultados. A opção por volumes constantes a entrar ou a sair nas fronteiras do modelo não é razoável porque o clima de agitação gera alternância dos sentidos de transporte. Não existindo capacidade de previsão de taxas de erosão ou acreção constantes nas regiões extremas da área modelada, foi considerada a opção de extrapolação das condições de transporte sedimentar em cada instante, com base no comportamento na vizinhança das fronteiras do modelo.

No cálculo dos volumes de sedimentos em transporte foi considerada a fórmula CERC porque representa uma menor dependência de parâmetros do que a fórmula de Kamphuis. O cálculo da profundidade de fecho seguiu a expressão de Hallermeier. Durante os diversos testes foram experimentados diferentes coeficientes empíricos de calibração da fórmula CERC. Além desse parâmetro, foram consideradas diferentes inclinações na evolução da parte imersa dos perfis em erosão. Quando considerada a inclinação variável de acordo com o perfil de equilíbrio de Dean, foram experimentadas diferentes dimensões médias para caracterizar os sedimentos e consequentemente a forma do perfil transversal de equilíbrio. A evolução da parte emersa dos perfis transversais em acreção foi admitida com inclinação nula e o ângulo de atrito dos sedimentos adoptado foi de 15°.

A tabela 6.23 mostra os resultados de algumas das tentativas de calibração para uma análise num horizonte de 10 anos, evidenciando as diferenças de resultados. Em geral, as taxas de recuo da linha de costa obtidas são maiores do que o esperado, pelo que foi decidido reduzir o coeficiente empírico da fórmula CERC para valores significativamente menores, como sugerido por diversos autores e referido na secção 4.4.1. Considerando o coeficiente empírico de calibração da fórmula CERC igual a 0.05, a dimensão média dos sedimentos igual a 0.2 mm e adoptando uma evolução da parte submersa dos perfis ajustada aos perfis de equilíbrio, os resultados parecem ser razoáveis. Nessa situação, os volumes em transporte são na ordem de um milhão de metros cúbicos por ano e as taxas de recuo da linha de costa são de cerca de 10 m/ano.

Tabela 6.23: Volumes de sedimentos em transporte e taxas de recuo da linha de costa, para uma simulação com horizonte de 10 anos.

$k$	$d_{50}$	Inclinação	Volumes ( $10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ )		Taxas de recuo (m/ano)			
	(mm)	inferior	Norte	Sul	$y = 375000 \text{ m}$	$y = 383600 \text{ m}$	$y = 392200 \text{ m}$	$y = 400800 \text{ m}$
0.05	-	0%	+0.7	-1.1	8.7	25.4	34.6	31.2
	-	0.5%	+1.0	-1.4	28.5	31.3	27.4	28.9
	0.1	Variável	+0.8	-1.1	41.9	36.0	33.8	35.7
	0.2	Variável	+0.9	-1.4	12.4	8.9	6.9	8.0
0.10	-	0%	+1.4	-2.1	17.8	41.6	49.6	52.3
	-	0.5%	+2.1	-2.8	35.6	31.9	27.5	33.9
	0.1	Variável	+1.7	-2.3	48.3	48.6	41.8	40.2
	0.2	Variável	+2.0	-2.9	13.6	11.9	-5.5	-4.3

Nota: Na fronteira Norte, os valores indicados com sinal positivo representam entradas de sedimentos na área modelada e pelo contrário, na fronteira Sul, o sinal negativo representa saída de sedimentos. Os valores indicados com sinal negativo nas taxas de recuo representam avanços da linha de costa.

Como já referido, o clima de agitação considerado e que origina o transporte sedimentar, respeita os valores de agitação marítima em ano médio. No entanto, a sequência da geração automática das alturas de onda é aleatória e independente da geração dos rumos e dos níveis de maré astronómica. Para avaliar a implicação de diferentes sequências de geração do clima de agitação nos resultados, foram processadas mais duas simulações com condições de cálculo idênticas à citada anteriormente como a de melhores resultados ( $k = 0.05$ ,  $d_{50} = 0.2 \text{ mm}$  e inclinação inferior variável). A tabela 6.24 mostra os resultados obtidos anteriormente e as duas novas situações. Os volumes de sedimentos em transporte são semelhantes em todos os cálculos, mas as taxas de recuo da linha de costa registam diferenças. Considera-se que nas condições de estudo, uma evolução a dez anos representa um horizonte demasiado próximo, que deixa a evolução da linha de costa numa situação ainda longe do equilíbrio. Aumentando o tempo de cálculo a linha de costa evoluiria para uma situação de maior equilíbrio, reduzindo diferenças originadas pelas diferentes sequências de geração da agitação marítima.



Tabela 6.24: Resultados de três simulações idênticas, dependendo apenas das sequências aleatórias em que foram gerados os anos típicos de agitação.

Situação	Volumes ( $10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ )		Taxas de recuo (m/ano)			
	Norte	Sul	$y = 375000 \text{ m}$	$y = 383600 \text{ m}$	$y = 392200 \text{ m}$	$y = 400800 \text{ m}$
1	+0.9	-1.4	12.4	8.9	6.9	8.0
2	+0.9	-1.5	11.9	8.9	2.4	0.3
3	+0.9	-1.4	12.9	7.8	3.5	3.4

Nota: Na fronteira Norte, os valores indicados com sinal positivo representam entradas de sedimentos na área modelada e pelo contrário, na fronteira Sul, o sinal negativo representa saída de sedimentos.

Pretendendo um horizonte de projecção mais longo, procedeu-se ao cálculo da evolução da linha de costa a 100 anos. Devido a instabilidades de cálculo relacionadas com a posição estabelecida para o desenvolvimento das inclinações próximas do perfil de equilíbrio, constatou-se que para períodos de modelação longos, os melhores resultados correspondem a uma inclinação da praia imersa a ser admitida constante e igual a 0%, mantendo o valor de 0.05 para o coeficiente empírico da fórmula CERC. Com o aumento do período de tempo de análise, resultam taxas de transporte sedimentar e de recuo da linha de costa menores, e a configuração da linha de costa aproxima-se duma situação de equilíbrio.

Tabela 6.25: Volumes médios anuais de transporte sedimentar e taxas de recuo médias anuais da linha de costa durante a aproximação ao equilíbrio, ao longo de cem anos de simulação de cálculo.

Período em análise	Volumes ( $10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ )		Taxas de recuo (m/ano)			
	Norte	Sul	$y = 375000 \text{ m}$	$y = 383600 \text{ m}$	$y = 392200 \text{ m}$	$y = 400800 \text{ m}$
10 anos	+0.7	-1.1	8.7	25.4	34.6	31.2
25 anos	+0.7	-1.0	11.7	20.9	21.9	23.0
50 anos	+0.6	-0.8	9.6	16.5	16.7	16.2
75 anos	+0.6	-0.8	8.4	14.3	14.2	13.1
100 anos	+0.6	-0.7	8.6	12.9	12.3	11.5

Nota: Na fronteira Norte, os valores indicados com sinal positivo representam entradas de sedimentos na área modelada e pelo contrário, na fronteira Sul, o sinal negativo representa saída de sedimentos.

A tabela 6.25 mostra a evolução de resultados no tempo, à medida que se integram períodos de análise superiores na determinação das taxas anuais. Admite-se que as taxas de erosão registadas sobreavaliem o comportamento real, mas as evoluções apresentadas são meros exercícios comparativos, não podendo representar situações reais.

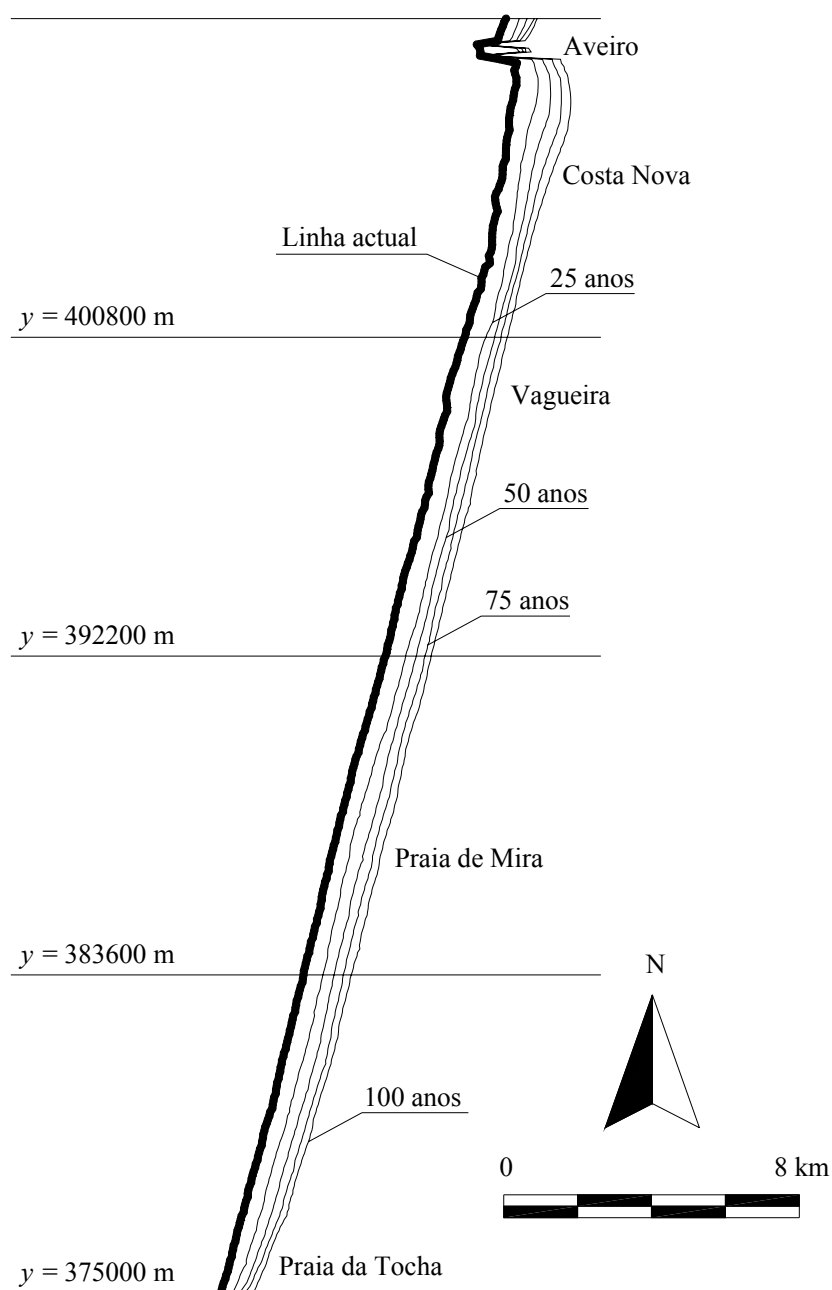


Figura 6.24: Resultado do modelo LTC para uma simulação a 100 anos, com  $k = 0.05$  e a evolução da parte imersa dos perfis transversais admitida com inclinação nula.

A figura 6.24 representa graficamente as configurações da linha de costa ao longo do tempo de simulação. Na figura é evidente a maior aproximação entre as linhas de costa respeitantes a maiores períodos de cálculo, confirmando os dados da tabela e a esperada convergência para uma situação de equilíbrio.

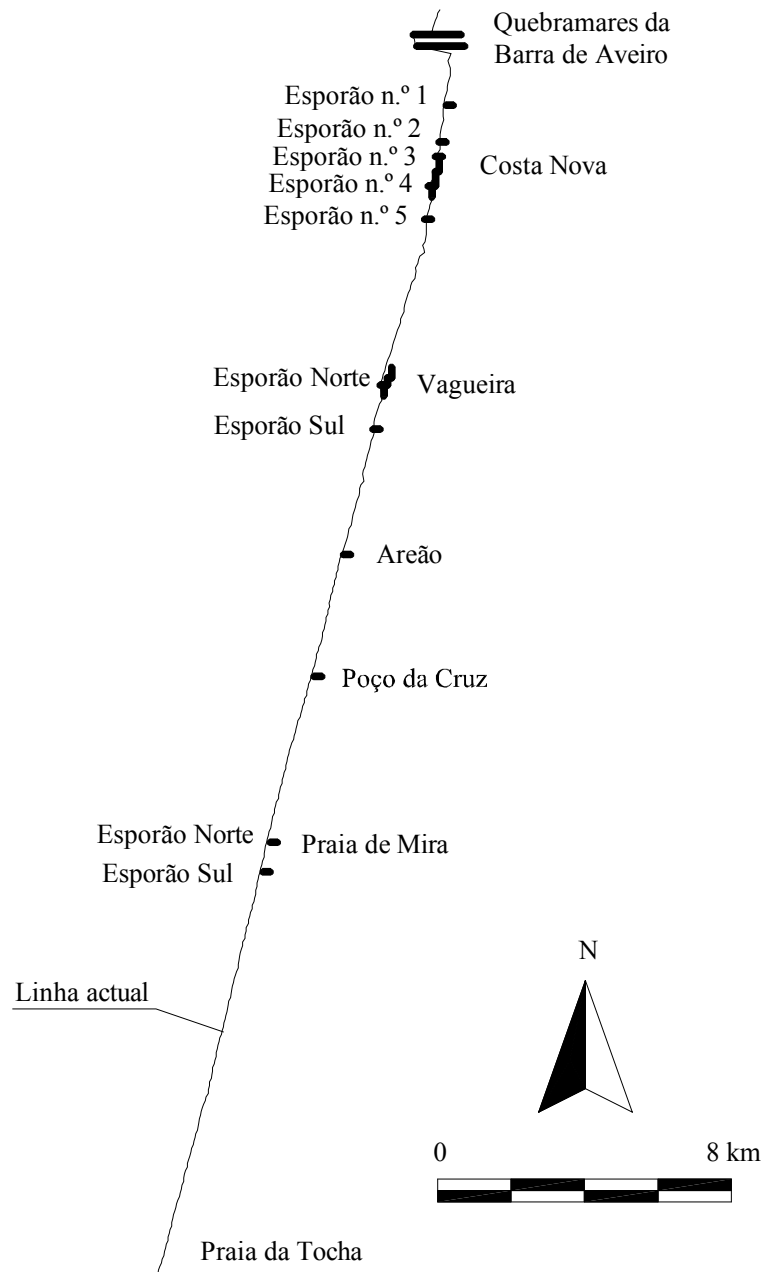


Figura 6.25: Localização das obras de defesa (quebramares, esporões e obras longitudinais aderentes) introduzidas na modelação.

Após a análise desenvolvida, procedeu-se à inclusão das obras de defesa que actualmente existem no litoral analisado. Consideraram-se os cinco esporões da Costa Nova e as obras longitudinais aderentes entre os esporões n.º 3 e n.º 4 e a Sul do esporão n.º 4. Também foram incluídos os dois esporões da Vagueira e a respectiva obra de defesa aderente. Integraram-se ainda os esporões do Areão e de Poço da Cruz, recentemente construídos e os dois esporões de Mira.

A figura 6.25 mostra um esquema de todas as obras consideradas, que devido às naturais limitações de modelação (nomeadamente o espaçamento entre pontos da grelha modelada e a orientação das obras de defesa) são uma aproximação da realidade.

A figura 6.26 apresenta as potencialidades de saídas gráficas de resultados que o programa possibilita. Numa escala de cores, a comparação de cotas altimétricas entre as situações inicial e final reflecte as variações volumétricas ao longo dos 100 anos de cálculo. A distribuição das alterações registadas é perceptível na representação da situação final.

No desenho central da figura 6.26, é delimitada em planta, a área activa correspondente aos pontos da grelha modelada que sofreram alteração de cotas ao longo do cálculo. No mesmo desenho, a comparação entre as configurações de linha de costa inicial e final, indica um recuo generalizado da posição da linha de costa. No entanto, a análise da configuração de linha de costa obtida na figura 6.24 e a representada como linha final na figura 6.26 permite constatar o benefício da introdução das obras de defesa, reduzindo significativamente as taxas de recuo da linha de costa em zonas como a Costa Nova e a Vagueira.

Os pontos fixos, representados pelas estruturas de defesa, permitem a manutenção artificial da posição da linha de costa. Nos trechos entre as estruturas de defesa verifica-se o recuo da linha de costa, sendo mais pronunciado imediatamente a barlamar das obras. Este facto, representa na realidade uma rotação da linha de costa, sugerindo que o clima de agitação marítima utilizado nos cálculos (ano médio definido de acordo com os dados já apresentados da bóia de Leixões), não está em equilíbrio com a configuração actual da linha de costa.

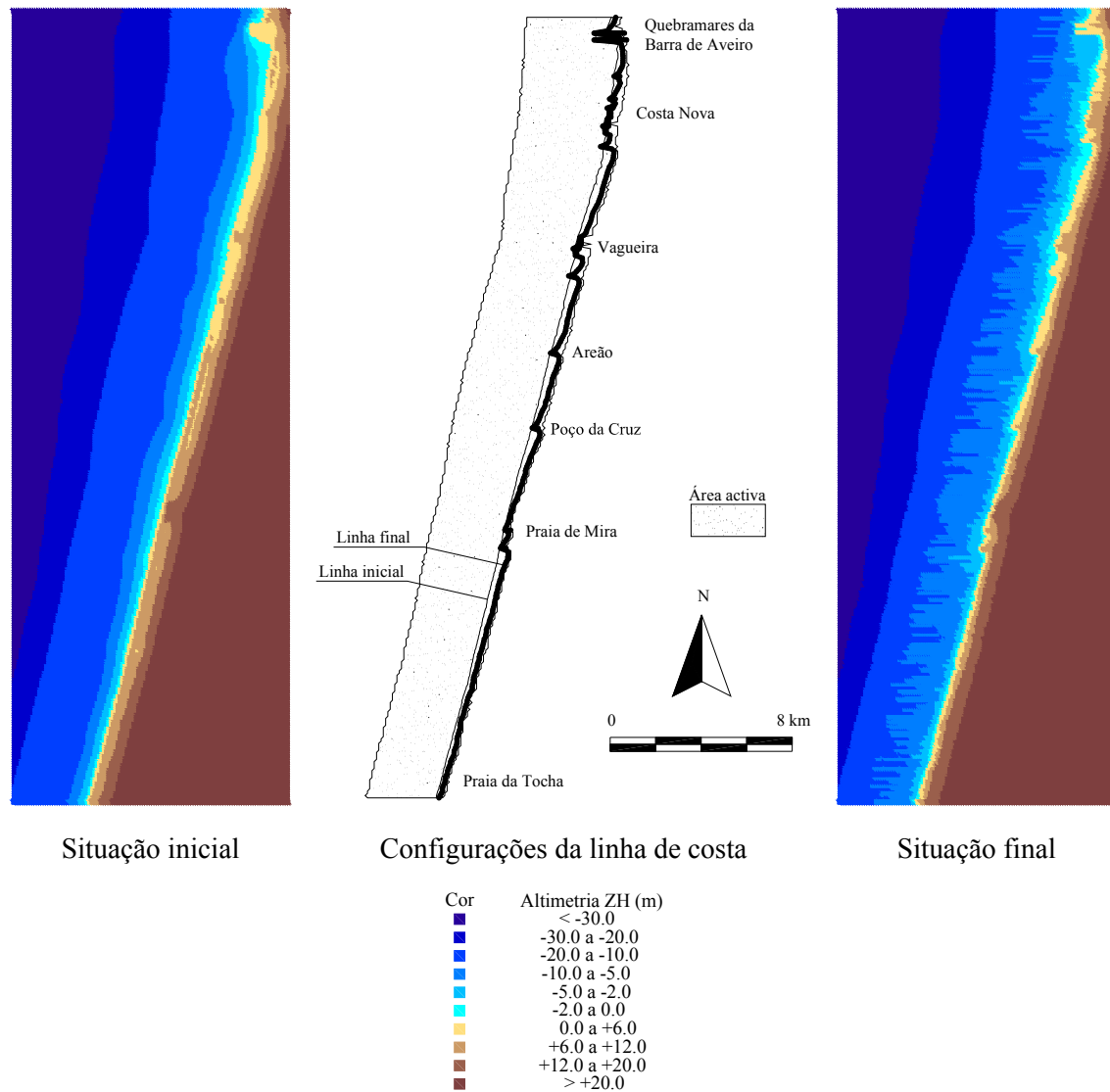


Figura 6.26: Representação dos resultados da simulação a cem anos, considerando as intervenções de defesa costeira existentes.

Para avaliar o efeito da subida do nível médio da água do mar, foi efectuada uma comparação da evolução da linha de costa num horizonte de cem anos, projectando dois cenários possíveis. Os cenários admitidos correspondem a subidas do nível médio da água de 1.5 mm/ano e de 5.0 mm/ano. Como se verifica na figura 6.27, a influência da subida do nível do mar é desprezável, quando comparada com os registos de recuos da linha de costa por défice sedimentar. Nestes resultados, a sequência aleatória de geração do clima de agitação correspondente a um ano médio pode ter consequências mais importantes do que a própria subida do nível médio da água do mar.

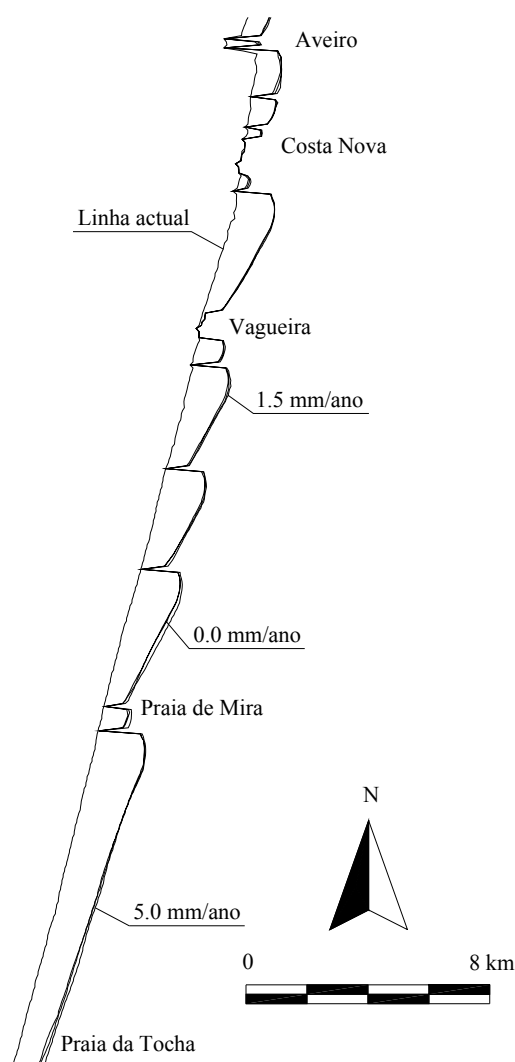


Figura 6.27: Comparação da evolução da linha de costa para diferentes projecções da subida do nível médio da água do mar, em cem anos.

A análise de diferentes cenários de proveniência das ondas também é importante na avaliação dos resultados e comportamento do modelo. Foi comparado o ano típico de agitação com duas novas situações. A geração aleatória de rumos ao longo de cem anos de cálculo, condicionada pelos espectros de rumos introduzidos, resultou nos climas de agitação (rumos de onda) apresentados na tabela 6.26. As condições de geração das alturas de onda e respectivos períodos foi mantida constante, pelo que estas características são similares em todos os casos estudados.

Como era esperado, os volumes de sedimentos em transporte são ligeiramente maiores no caso das ondas rodadas para Norte (entram  $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  na fronteira Norte e saem  $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  na

fronteira Sul) do que no ano típico ou quando as ondas são rodadas para Sul (neste caso, entram  $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  na fronteira Norte e saem  $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  na fronteira Sul).

Tabela 6.26: Percentagem de proveniências das ondas em cada quadrante de rumos, para os três cenários de rumos modelados.

Quadrante	Ano típico	Rotação das proveniências em $6.125^\circ$ para Norte	Rotação das proveniências em $6.125^\circ$ para Sul
NNW	12.06	22.75	9.13
NW	42.40	40.41	34.79
WNW	33.96	27.29	35.92
W	7.70	6.17	14.26
WSW	1.91	1.79	3.41
SW	1.47	1.19	1.60
SSW	0.50	0.40	0.89

Entre o quebramar Sul da Barra e os primeiros esporões da Costa Nova os resultados obtidos para os três cenários confundem-se, não se registando nenhuma tendência significativa. No entanto, a situação entre o esporão n.º 5 da Costa Nova e o esporão Norte da Vagueira mostra uma clara e esperada rotação da linha de costa em função dos cenários admitidos. Na zona Norte deste trecho, a menor rotação da linha de costa representa um também menores recuos, mas a Sul verifica-se um agravamento dos recuos registados. A máxima distância entre os cenários projectados a cem anos é neste troço de cerca de 360 m.

A situação entre o esporão Sul da Vagueira e o Areão é semelhante à agora descrita, bem como os resultados entre o esporão de Poço da Cruz e o esporão Norte de Mira. A sotamar do esporão Sul de Mira há também o agravar das erosões com as ondas provenientes mais de Norte e a redução das erosões com as ondas mais de Sul. Esta situação verifica-se em cerca de 2.5 km de extensão.

Em resumo, verifica-se que quando a extensão dos troços entre esporões é diminuta, a linha de costa não chega a desenvolver os resultados descritos nos trechos anteriores. No caso das maiores distâncias entre esporões, a linha de costa sofre uma rotação de forma a ajustar-se à direcção de proveniência das ondas. A rotação ocorre em torno de um ponto intermédio do trecho, traduzindo variações na posição da linha de costa nas zonas a barlar e a sotamar. Interessante é também

constatar que os resultados do cenário de agitação rodado para Sul são o que mais se aproxima do paralelismo com a linha de costa actual, indiciando talvez que a projecção adoptada do clima de agitação em Leixões devesse sofrer um ajuste onde os rumos de WNW e W ganhassem maior importância.

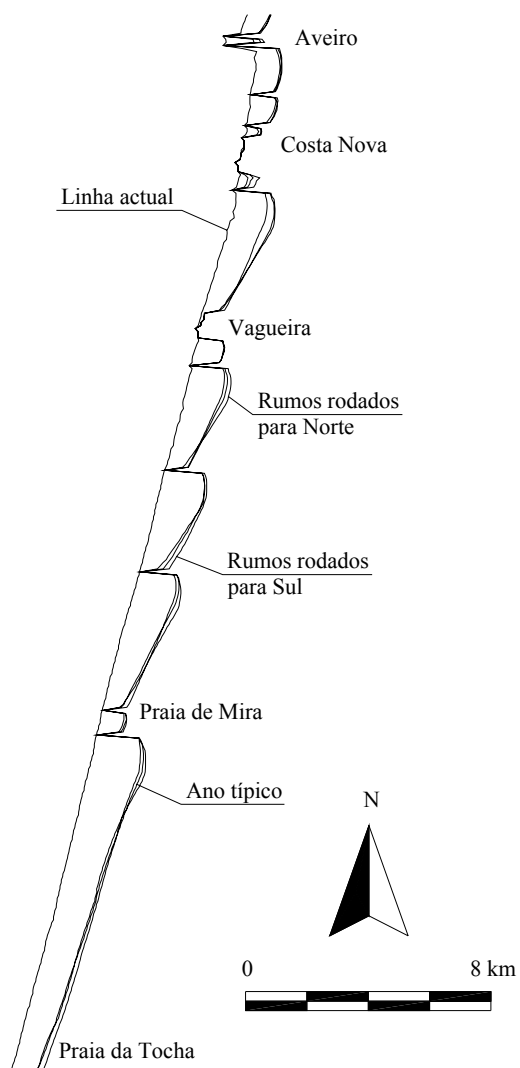


Figura 6.28: Comparação da evolução da linha de costa para diferentes projecções de rumos da agitação, em cem anos.



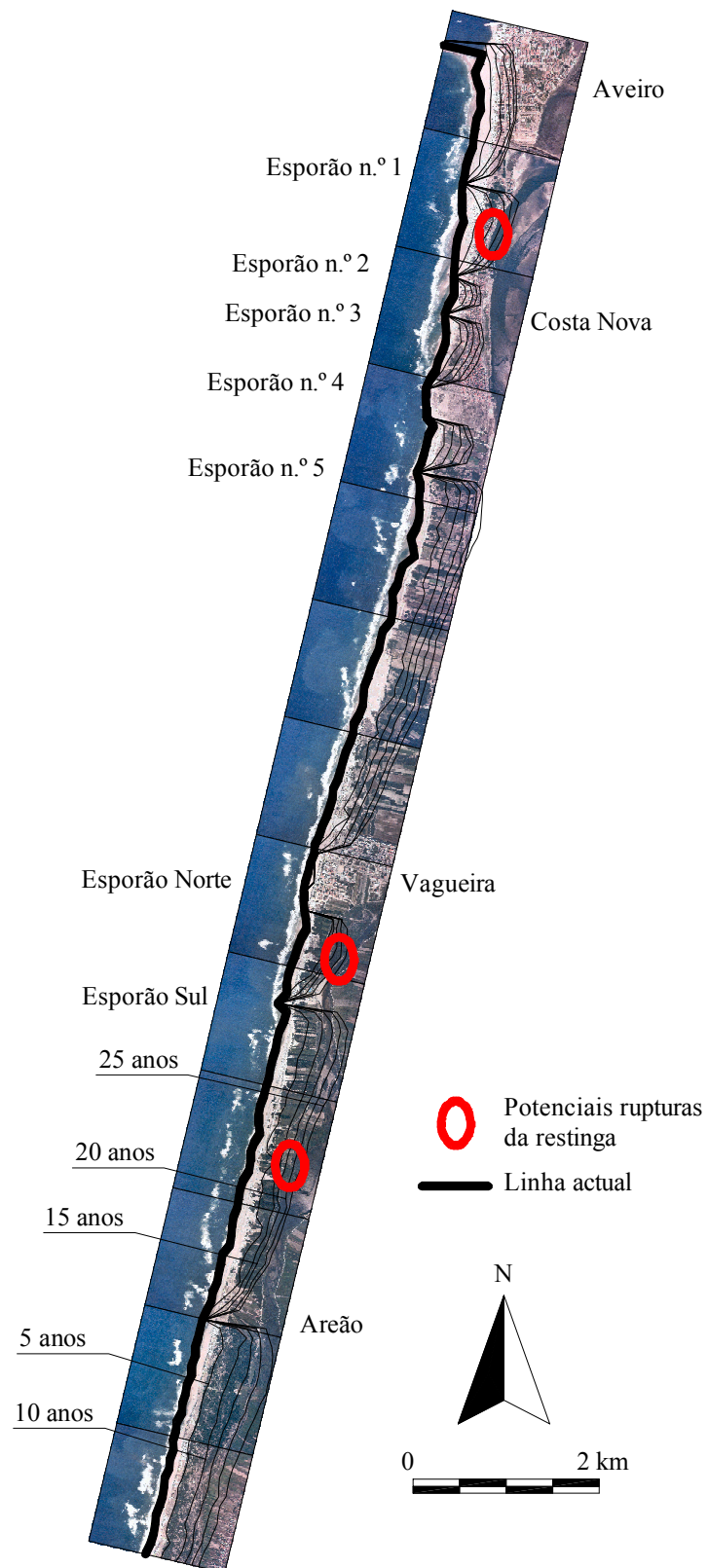


Figura 6.29: Representação de um cenário de evolução da linha de costa a 25 anos, sobre uma base correspondente à fotografia aérea de 2001.

Na figura 6.29 representa-se sobre a fotografia aérea de 2001, o resultado de uma simulação a 25 anos. Esta representação permite identificar facilmente as zonas mais frágeis e onde são de temer rupturas da restinga Sul. Note-se que na modelação, nem todas as actuais obras de defesa aderente foram consideradas, pelo que a região da Barra começaria a estar em risco num cenário de menos de dez anos.

Entre os esporões n.º 1 e n.º 2 da Costa Nova existe uma das situações mais graves, com a ruptura da restinga e a ligação entre a ria e o oceano a acontecerem num cenário de 10 a 15 anos. Aliás, toda a região da Costa Nova está em risco de grandes perdas territoriais. A região imediatamente a Norte da Vagueira, protegida pelo esporão e obras aderentes projecta-se como um pequeno cabo, mantido artificialmente. A Sul desta zona, também existem potenciais problemas, projectados para um horizonte de cerca de 20 anos.

**Capítulo7**  
**CONSIDERAÇÕES FINAIS**

...

E o mar, até hoje, quebra e requebra a onda  
Para eu ouvir o som do início.

*Fiama Hasse Pais Brandão (in Canto do Génesis)*



## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nesta dissertação foi experimentada uma avaliação de vulnerabilidades e riscos. Foram alvo de análise diversas acções (agitação marítima, marés astronómicas, marés meteorológicas, ventos, etc.) e as interacções entre essas acções e as fronteiras sólidas naturais (praias, dunas, fundos costeiros) e artificiais (obras de defesa). Foram estudadas modelações e sensibilidades de parâmetros intervenientes nos diversos fenómenos costeiros. Foi proposto um novo modelo numérico para auxiliar a projectar cenários de evolução da linha de costa, em função de diferentes tipos de intervenção costeira. Este capítulo corresponde a um resumo de todo o trabalho desenvolvido, destacando as principais conclusões e projectando os desenvolvimentos futuros.

### **7.1 Síntese de Resultados**

Nesta secção pretende-se resumir e realçar alguns dos aspectos considerados de maior relevância no desenvolvimento dos diversos capítulos da dissertação. Após o capítulo inicial, onde são introduzidos alguns dos problemas abordados e o contexto em que se inserem, foram apresentados cinco capítulos. São esses capítulos que são alvo de análise nesta secção.

No capítulo 2 é efectuada uma apresentação do estado da arte no que respeita a métodos e estratégias de análise de vulnerabilidades e riscos das zonas costeiras associadas às acções energéticas do mar, tentando ser um contributo para a edição de uma forma de classificação geral, simples e eficaz dos territórios costeiros.

Apresenta-se uma nova proposta de análise e classificação de vulnerabilidades e riscos que tem a vantagem de possibilitar a atribuição de uma classificação, dividida em cinco classes de risco, desde que se tenha um razoável conhecimento do território e da sua evolução morfológica. Uma análise de vulnerabilidades e riscos apresentada desta forma tem como grande atractivo o aspecto intuitivo da classificação, frequentemente desejável em instrumentos de ordenamento. No entanto, para além de alguma subjectividade, a apresentação de resultados tem que ser exposta em função de diferentes horizontes em análise (10 anos, 50 anos, 100 anos, etc.) obrigando a projectar comportamentos das zonas costeiras e intervenções futuras.

Para que seja possível avaliar, com fundamentação científica e técnica, a sensibilidade das diferentes zonas costeiras, é essencial uma boa capacidade de previsão e projecção do futuro. A previsão do futuro implica o conhecimento e a compreensão dos fenómenos físicos, sociais e económicos envolvidos, conhecimento e compreensão que à data actual são ainda limitados. Por este motivo, o trabalho desenvolvido focalizou-se no sentido de apresentar contributos e melhorar essas capacidades de previsão.

No capítulo 3 apresenta-se uma caracterização das zonas costeiras e das acções que condicionam a sua evolução, quer a nível das acções naturais, quer em termos de acções humanas. Para as acções naturais, destaca-se a importância e a dificuldade em aceder a séries de registos que permitam fundamentar e extrapolar valores. É de salientar o elevado custo para consulta de alguma informação que os Institutos do Estado possuem e as graves lacunas existentes, nomeadamente a nível topo-hidrográfico (estes deveriam disponibilizar todos os elementos, de forma a promover a investigação).

As acções naturais são extremamente difíceis de prever e como tal aumentam a forma complexa dos estudos desenvolvidos e a desenvolver. Em relação ao regime de ventos, verificou-se que as principais tendências de comportamento da série de dados adquirida ao Instituto Meteorológico são comuns a outras referências encontradas, mas em termos médios a série apresenta diferenças, o que realça a dificuldade de estabelecer um regime típico de ventos.

Os dados relativos às características da ondulação, nomeadamente alturas e períodos de onda e rumos, foram adquiridos ao Instituto Hidrográfico, mas as sequências de registos apresentam lapsos importantes. O tratamento dos dados de agitação foi igual para todos os registos, apesar dos registos em situação de temporal existirem com maior periodicidade (em vez das três horas habituais entre registos). Este facto serviu para minorar os efeitos das faltas de dados que ocorrem maioritariamente em período de temporal (por incapacidade de medição ou avaria dos aparelhos de medição). Assim, o critério foi compensar de alguma forma as faltas de dados com dados mais frequentes em outros períodos.

A análise dos elementos de ondulação resultou em valores médios semelhantes a outras referências encontradas. Esta série de registos já tem uma extensão considerada razoável, sendo importante que se continue a proceder a registos de valores, de forma a tentar estabelecer padrões de comportamento. Entende-se que a caracterização de anos médios de agitação é possível com base

nestes dados. A ocorrência de situações atípicas ou extremas (tempestades) é de difícil previsão e pode representar uma importância significativa nos processos costeiros.

A série temporal de registo de agitação coincide com a série de registos de vento, permitindo uma análise do comportamento simultâneo destas acções. Assim, verifica-se uma relação evidente entre ventos e a agitação marítima, nomeadamente no que se refere a direcções de actuação. Em termos médios, existe uma correlação entre velocidades do vento e alturas da ondulação. As alturas de onda mais elevadas ocorrem em situações de velocidades de vento mais elevadas. Regista-se que as situações de temporal persistente estão usualmente associadas a ventos de Oeste.

Diversos fenómenos costeiros são avaliados em função das características de agitação local ou na rebentação. Foram referidas diferentes técnicas de modelação dos fenómenos de propagação das ondas até à costa e evidenciadas algumas das lacunas existentes. Qualquer dos modelos apresenta limitações, que terão maior ou menor influência nos resultados em função do tipo de objectivo pretendido.

Relativamente às actividades antropogénicas, pretendeu-se evidenciar e alertar o cada vez maior impacte das actividades humanas no comportamento da morfologia costeira. A quantificação de volumes de sedimentos envolvidos nas operações de dragagens e extracções de areias deve ser controlada e divulgada pelas entidades competentes, em benefício da compreensão dos comportamentos e de balanços de transporte sedimentar. Apesar das extracções de areias (fluvial e marítima) serem fiscalizadas, não há registo fiável de volumes extraídos. As dragagens em canais de navegação devem resultar na colocação de areias a sotamar, sem perda de sedimentos no sistema costeiro.

A pressão urbana exercida pelas preferências na ocupação e utilização do litoral, as actividades portuárias, as intervenções de defesa, são exemplos de acções directas sobre os ambientes costeiros. Como acção indirecta indicam-se os aproveitamentos hidráulicos, que ao alterarem o regime hidrológico dos rios, têm diversas consequências no volume sedimentar a atingir o litoral, bem como outras intervenções a nível de bacias hidrográficas.

No capítulo 4 procedeu-se a uma análise dos fenómenos envolvidos nas interacções entre o meio terrestre e o mar. O transporte sedimentar é de fundamental importância, no entanto a sua quantificação é extremamente difícil. A formulação física dos comportamentos e interacções entre

grandezas é ainda limitada. Nas tentativas de estudo e modelação, o processo de transporte sólido é considerado nas suas componentes longitudinais e transversais à costa, facilitando a sua análise.

A aplicação de modelos está dependente da caracterização dos elementos intervenientes nos processos, pelo que as propriedades da água do mar e dos sedimentos da costa são necessariamente avaliadas. Na generalidade, estas propriedades são bem conhecidas e de fácil estimativa, mas refere-se por exemplo, a dimensão característica dos sedimentos como uma grandeza fundamental, mas com uma distribuição espacial e temporal muito variável.

Nos processos de transporte sólido longitudinal avaliaram-se diversos aspectos físicos. Percorrendo diversas tentativas de modelação ao longo do tempo, separaram-se as componentes de transporte originadas por correntes e por ondas. Estes tipos de transporte podem ainda ser divididos em duas parcelas, uma correspondente ao transporte que ocorre junto ao fundo e a outra, ao transporte em suspensão. Foi efectuada uma análise de sensibilidades e de comparação entre métodos, que permitiu concluir que à tradução matemática dos fenómenos ainda está associada uma elevada incerteza. A comparação entre os resultados de experiências realizadas em laboratórios e dos modelos conduzem facilmente a diferenças na ordem dos 100% e a transposição para situações reais que se verificam na natureza, traduzem incertezas superiores.

O comportamento dos perfis transversais e dos processos de transporte sólido transversal está dependente de diversos conceitos que foram abordados e analisados com detalhe. A inclinação da face da praia, o perfil transversal activo, o perfil de equilíbrio, o comportamento do perfil à subida generalizada do nível médio do mar e indicadores de previsão de erosão ou acreção são disso exemplo.

Tal como a dimensão das areias de uma praia, a inclinação da praia é variável no tempo e no espaço e é importante em numerosas aplicações de engenharia costeira. Como tal, existem diversas fórmulas propostas para a sua determinação, que evidenciam essencialmente a dependência da inclinação da praia com as características da agitação e com a dimensão dos sedimentos. A inclinação da praia relaciona-se directamente com o comportamento dissipativo ou reflectivo da própria praia, sendo o primeiro correspondente a praias de menor inclinação, enquanto o segundo corresponde a praias mais inclinadas.

A definição de um perfil transversal activo é outro conceito fundamental na resolução de problemas de engenharia, nomeadamente na definição de alimentações artificiais de praia, no cálculo de



balanços sedimentares e na modelação numérica. A profundidade activa limita a secção a partir da qual não existem alterações significativas na batimetria, ao longo do tempo. Este conceito pode ser quantificado por equações matemáticas dependentes das características de agitação, mas deve ser confirmado com trabalho de campo, que efectue medições periódicas ao longo dos anos em determinadas zonas costeiras, permitindo o benefício de investigações futuras. As duas fórmulas de uso generalizado para a determinação da profundidade de fecho representam diferenças correntes, na ordem de 30%.

Como as características referidas anteriormente, o perfil de equilíbrio obedece a diferentes propostas de equações para a sua definição. A equação de Dean é a mais aplicada por ser aquela que depende de um menor número de parâmetros, no entanto apresenta a desvantagem de considerar inclinação infinita no ponto inicial de representação do perfil e o facto da forma do perfil ser monotónica. Por esse motivo, pode-se referir que há actualmente trabalho de diferentes autores no desenvolvimento de diferentes modelos de perfis de equilíbrio, que têm como objectivo manter um número reduzido de parâmetros envolvidos na sua definição, mas admitem o pressuposto de uma barra submersa.

No estudo do comportamento dos perfis transversais, a regra de Bruun serve em primeiro lugar para constatar que a relação entre uma eventual subida do nível do mar e o recuo da linha de costa não é directa. De facto, com a subida do nível do mar ocorre um desequilíbrio do perfil transversal que provoca um ajuste com erosão de parte do perfil e deposição em zonas mais profundas, sem que exista alteração de massa no perfil transversal. Esta regra e outras semelhantes, aplicadas com o mesmo objectivo, são essencialmente dependentes das características geométricas dos perfis transversais e da capacidade de projecção de cenários de subida do nível do mar.

Os indicadores de previsão de erosão ou acreção através dos processos de transporte transversais são altamente dependentes da dimensão dos sedimentos, dependendo também do clima de agitação, representado pela altura das ondas significativas.

A avaliação do potencial de transporte de sedimentos longitudinal corresponde à avaliação integral do volume de sedimentos em circulação numa secção transversal, com dependência de um número reduzido de parâmetros e englobando as diversas componentes de transporte. Esta abordagem é essencialmente dependente da capacidade energética da agitação e da direcção de incidência da ondulação com a costa. Apesar do número reduzido de parâmetros, a sua variabilidade permite resultados bastantes diferenciados, demonstrando mais uma vez a dificuldade existente na

quantificação de volumes em circulação. A forma como esse volume se distribui na secção transversal é também de difícil avaliação, sendo muito diferente para os diferentes tipos de rebentação da ondulação. No entanto, a zona junto à praia é considerada usualmente como a zona onde ocorre a maior concentração de sedimentos em transporte.

No capítulo 5 aborda-se o problema da previsão das configurações da linha de costa. A configuração tratada como um problema de aproximação de uma equação matemática entre dois pontos fixos aproxima-se por vezes de bons resultados, mas evidencia lacunas importantes, principalmente relacionadas com as características topográficas e geomorfológicas. Assim, depois da análise de diversas modelações de configurações espirais em planta, que permitiram a discussão e constatação de diversas limitações, foram avaliados modelos numéricos mais robustos e com maior potencialidade.

Actualmente, está estabelecido que a modelação é indispensável, não só para compreender e prever a dinâmica dos sistemas costeiros, mas também para uma efectiva tomada de decisões e eficiente solução dos complexos problemas dos ambientes costeiros. Cada vez mais sofisticados, os modelos conduzem a avanços na compreensão das várias características costeiras e dos processos físicos envolvidos. Não existe um modelo universal para análise e previsão da evolução da costa numa escala de dezenas de anos, mas dependendo da natureza do problema e dos objectivos do projecto, existe um número alargado de modelos com abordagens distintas e com pontos de vista específicos.

No âmbito da presente dissertação, foi desenvolvido um modelo genérico que se pretende, venha a auxiliar de forma significativa as capacidades de previsão e a resposta a determinadas intervenções costeiras. O modelo designado de LTC permite a exploração de diferentes soluções, mantendo-se o controlo dos diversos pressupostos de cálculo. O modelo é apropriado para costas arenosas. Foram testados o comportamento e sensibilidade do modelo a uma grande diversidade de factores. Foi avaliada a dimensão da malha utilizada na necessária discretização da topografia na modelação e o tempo de cálculo para que a evolução convirja para situações de equilíbrio.

Considera-se muito importante que sejam conhecidas as condições fronteiras das áreas a modelar, pois foi demonstrado que os resultados podem ser significativamente diferentes. O modelo LTC apresenta uma importante diferença em relação a outros modelos similares, podendo ser representada a topografia das zonas em erosão, que traduzem evoluções distintas em função das cotas altimétricas. Para maior versatilidade de modelação é possível optar por diferentes considerações de cálculo, podendo as diversas equações traduzir também importantes diferenças.

A forma de evolução dos perfis transversais em constante erosão ou acreção é um dos aspectos de maior importância no modelo. Como este comportamento é na realidade mal conhecido, o programa permite diferentes opções, que conduzem a resultados significativamente diferentes. Esta possibilidade pretende adequar os resultados de aplicações a zonas distintas. Admitindo que os pressupostos de alguns modelos similares não são os mais indicados em algumas situações, considera-se que será importante compreender e melhorar esta questão fundamental para a modelação.

Com o intuito de prever o comportamento de diferentes intervenções de defesa costeira, também foi implementada no programa a possibilidade de simulação de fontes aluvionares pontuais, alimentação artificial de areias, esporões e campos de esporões e ainda obras longitudinais aderentes. Partindo de pressupostos de comportamento que são ainda alvo de discussão (como a transposição sedimentar em esporões), constatou-se no entanto, que os resultados foram compatíveis com os comportamentos frequentemente admitidos como correctos.

As acções avaliadas no modelo são a agitação incidente e as marés, podendo estas ser conjugadas de variadas formas, representando diversas projecções de cenários de agitação marítima. O nível das águas é dependente de marés astronómicas, marés meteorológicas e ainda de eventuais subidas generalizadas do nível da água do mar. No modelo, só a acção das ondas é que possui capacidade de transporte sedimentar, intervindo o nível da água como forma de alterar a posição do perfil activo.

No modelo LTC realça-se a tentativa de introduzir o efeito das marés, já que se admite que o mesmo clima de agitação tem consequências distintas caso exista ou não amplitude significativa de marés. Os efeitos dos temporais são mais graves durante os intervalos de tempo que incluem a preia-mar. A refacção e a rebentação das ondas podem apresentar variações importantes ao longo do ciclo da maré. O mesmo se pode afirmar em relação à evolução do perfil das praias e em relação à transposição de sedimentos em torno de esporões e de quebra-mares. A topografia nas zonas terrestres adjacentes à costa é outro aspecto fundamental, já que zonas costeiras morfologicamente semelhantes e em erosão serão mais vulneráveis no caso de terem zonas adjacentes a cotas baixas (planícies aluvionares de baixa altitude), quando comparadas com zonas de cotas altas (campos dunares, zonas com relevo).

Outra forma de modelação da evolução das zonas costeiras consiste na conciliação de modelos de transporte de sedimentos com modelos que simulam os fenómenos que ocorrem durante a

propagação das ondas. Esta solução permite uma grande diversidade de sistemas de modelos integrados, representando significativas diferenças de tratamento. A consideração de parâmetros representativos dos fenómenos em estudo (diâmetros característicos dos sedimentos, agitação marítima e amplitudes de maré, tempo de cálculo) também constitui frequentemente uma dificuldade. A grande disparidade de opções de modelação e da incerteza de valores a utilizar, confirma a necessidade de continuar a investigação do comportamento dos fenómenos costeiros, aumentando as capacidades de previsão.

O capítulo 6 é constituído por uma diversidade de aplicações a situações concretas da costa aveirense, permitindo a avaliação das principais dificuldades de transposição de conceitos e modelos à realidade costeira. Para tal, é apresentada uma caracterização sumária da história da dinâmica desta região costeira e das intervenções de defesa que foram efectuadas, com a intenção de controlar a sua evolução. A recolha de valores de transporte sedimentar característicos da região também foi efectuada e pretendeu sustentar os resultados das diversas aplicações.

Foram projectados cenários de agitação, considerados típicos da faixa costeira ocidental portuguesa e foi simulada a sua propagação até à costa. Para tal, foi necessário recorrer ao modelo numérico SWAN e a dados de batimetria. Realça-se aqui a dificuldade em obter elementos altimétricos actualizados (que englobem batimetria e altimetria), pelo que a aplicação apresentada baseia-se em cartografia de pescas do Instituto Hidrográfico, que foi complementada com dados de topografia resultantes de fotografia aérea de 1996, resultando uma base altimétrica que simula uma situação aproximada das características da faixa litoral de Aveiro.

Para a caracterização das areias da área de estudo efectuou-se uma campanha de recolha de amostras em vinte locais e ao longo de um período de um ano e oito meses. Os resultados evidenciam a grande variação da dimensão média dos sedimentos, quer em termos espaciais, quer temporais. A tentativa de relacionamento dos resultados obtidos com as características de agitação nos períodos que antecederam as campanhas não conduziu a conclusões relevantes.

Os perfis transversais que resultaram da base altimétrica já referida foram analisados sob diversos aspectos. A forma do perfil não se aproxima da configuração de equilíbrio de Dean para as dimensões de areias obtidas nas campanhas de campo. Este facto poderá significar que os perfis na região de Aveiro não estão próximos do equilíbrio.

Como foi referido, a inclinação da praia é muito dependente da dimensão dos sedimentos e das características da agitação. Mantendo estas características comuns, os resultados das expressões existentes podem variar em mais de 100%. No entanto, as estimativas efectuadas sugerem valores para a costa de Aveiro, na gama dos valores usualmente observados, ou seja, entre os 2% e os 10% de inclinação.

Foi realizado o cálculo do recuo da linha de costa, por aplicação da regra de Bruun para diversos cenários de projecção da subida generalizada do nível do mar. Para as características geométricas dos perfis transversais de Aveiro, as perspectivas de regressão da costa não são muito significativas, quando comparadas com as taxas de recuo registadas actualmente. Não se devendo desprezar este efeito, serão no entanto outros aspectos focados, os principais motivos da generalizada regressão da linha de costa na região.

A avaliação da capacidade de transporte sedimentar longitudinal é complexa. Uma análise de sensibilidades demonstrou que pequenas variações em alguns pressupostos podem originar diferenças importantes nos resultados. Refira-se em particular a avaliação da direcção da linha de costa. A estimativa de valores conduziu a resultados superiores aos usualmente encontrados na bibliografia para a costa ocidental portuguesa. É maior a capacidade de transporte das ondas provenientes de Sudoeste, mas estas são menos frequentes, pelo que o sentido da deriva litoral é de Norte para Sul.

Os modelos que traduzem a configuração da linha de costa em planta através de uma expressão matemática poderão ser apropriados para situações de equilíbrio estático. As situações testadas a Sul da barra de Aveiro não atingiram ainda esse equilíbrio. A aplicação dos modelos demonstra também a grande dependência e dificuldade relacionadas com a determinação da posição do centro de difracção, estabelecimento de um rumo de agitação dominante e posição de sotamar correspondente à tangente da linha de costa com essa direcção da agitação. Estes modelos não incluem outras características (topografia, batimetria e geologia), necessariamente importantes na evolução da linha de costa.

Apesar das características gerais do modelo LTC conduzirem a um comportamento genérico adequado, a aplicação do programa à costa de Aveiro só é possível com a calibração de diversos aspectos. Essa calibração é difícil de compatibilizar, levando a que os resultados sejam analisados com cuidado e entendidos de uma forma mais qualitativa do que quantitativa. O modelo permite verificar que são elevadas as probabilidades de ruptura da restinga de Aveiro, com consequências e

impactes importantes na região. Esta afirmação demonstra a importância de estudar as vulnerabilidades e riscos associados aos problemas de erosão das frentes urbanas.

## 7.2 Conclusões

Foram apresentados contributos na identificação de questões chave na avaliação de vulnerabilidades e riscos associados às acções energéticas do mar. O conhecimento dos processos que ocorrem na orla litoral e a capacidade de compreensão e previsão da evolução dos comportamentos da morfologia das zonas costeiras são fundamentais, possibilitando diferentes cenários de projecção e melhorando o apoio ao processo decisório.

A avaliação de vulnerabilidades e riscos tem uma importância crescente na sociedade contemporânea. A percepção dos riscos é importante para os serviços de protecção civil e autoridades de segurança nos processos de decisão e acção. Os riscos podem variar no tempo, quer por alterações das vulnerabilidades da zona costeira, quer por alterações nas consequências das acções energéticas do mar. Por isso, a obtenção de um critério para definir o risco não é simples, nem pode ser objectivo. A analogia e a comparação com diferentes situações são muito importantes.

Existem variadas dificuldades no tratamento das questões costeiras, para além das muitas incertezas associadas à aplicação de modelos a situações concretas, por limitações dos próprios modelos e especificidades de cada situação. Os conceitos e teorias que têm como objectivo compreender os fenómenos costeiros são ainda de aplicação limitada.

A tentativa de explicação matemática e física dos fenómenos de transporte sedimentar ao longo da costa já existe com algum relevo desde os meados do século XX. A complexidade envolvida condiciona os resultados conduzindo a diferenças importantes consoante os pressupostos adoptados. A comparação entre modelações numéricas e físicas conduzem a incertezas, que quando transpostas para situações reais que se verificam na natureza, são ampliadas. Na aplicação de modelos de transporte longitudinal realçam-se as diferenças de valores obtidos nos diversos métodos, bem como a dificuldade de quantificar algumas das grandezas intervenientes nos cálculos. Os resultados dos diferentes modelos nem sempre são consistentes no comportamento em relação a determinadas grandezas.

A análise do comportamento dos perfis transversais relaciona-se fundamentalmente com evoluções a curto prazo. Associados aos perfis transversais estão conceitos importantes na análise e modelação de comportamentos longitudinais e em planta, e previsões de evolução a médio e longo termo. A definição de um declive representativo da face da praia é subjectiva face à existência de perfis transversais com geometrias complexas e variáveis no tempo. Medições periódicas no campo, da alteração na forma dos perfis transversais e da sua relação com o clima de agitação são necessárias para reduzir a incerteza associada ao conceito de profundidade de fecho. As características geométricas dos perfis transversais, dependendo da profundidade de fecho, são utilizadas na formulação dos perfis de equilíbrio ou na avaliação dos níveis de erosão originados pela subida do nível médio das águas do mar. O conceito de perfil de equilíbrio é uma valiosa ferramenta da engenharia costeira, já que muitos dos conceitos e relações de projecto são baseadas nesta noção.

Ainda existem limitações associadas à incerteza dos parâmetros e à complexidade das considerações de balanço sedimentar dos pressupostos da regra de Bruun para prever as taxas de recuo da linha de costa. A previsão da probabilidade de erosão ou acreção das praias através dos processos de transporte transversais é fundamentalmente dependente da dimensão dos sedimentos e da agitação marítima. Os resultados obtidos para as praias com sedimentos de maior dimensão reflectem uma baixa probabilidade de erosão e, por outro lado, as praias de areia fina têm uma probabilidade de erosão mais alta.

A avaliação do potencial de transporte de sedimentos relaciona o volume de sedimentos com poucos parâmetros de ondas e da praia. A calibração de dados fica assim mais simples de conseguir, mas as respostas são menos sofisticadas. Em geral, os níveis significativos do transporte longitudinal ocorrem na proximidade da linha de costa. No entanto, existe grande variabilidade na forma de distribuição transversal do transporte.

A análise de configurações da linha de costa em planta permite a percepção de diversas limitações e dúvidas. Pelo carácter aleatório de muitos dos factores envolvidos, não é possível prever uma linha final como solução, mas possivelmente uma faixa provável para a sua localização.

Progressivamente mais sofisticados, os modelos numéricos conduzem a avanços na compreensão das várias características costeiras e dos processos físicos envolvidos. Na generalidade, o funcionamento dos modelos numéricos baseia-se no cálculo do transporte sedimentar e na aplicação da equação de continuidade aos volumes de areia movimentados. A utilização dos

modelos numéricos é uma técnica poderosa de apoio, auxiliando na organização de elementos e na avaliação de soluções em diferentes cenários. A generalidade dos modelos actuais são validados em situações esquemáticas e quando aplicados a casos reais, são calibrados com base em dados específicos. Depois de calibrados, os modelos são aplicados de forma diferenciada, em situações de análise, avaliação de cenários e previsão de condições futuras.

O modelo de cálculo desenvolvido apresenta ainda diversas lacunas (de acordo com o conhecimento actual dos fenómenos envolvidos), podendo ser aperfeiçoado, mas possibilita uma aproximação à previsão da evolução a situações reais. Os testes desenvolvidos esclarecem algumas questões levantando outras, às quais não é ainda possível dar uma resposta. A validação de algumas respostas pode ser conseguida com a análise de resultados reais, mas dados de campo são escassos e difíceis de obter.

No modelo é possível controlar a evolução da forma do perfil em situação de acreção e erosão através da limitação de alguns parâmetros. Existe a necessidade de estudar qual a forma dos perfis transversais quando evoluem no tempo. A caracterização granulométrica das areias e a caracterização geométrica dos perfis activos é fundamental na modelação. É importante quantificar a capacidade de transporte sedimentar longitudinal para diferentes climas de agitação e qual a sua distribuição no perfil transversal.

Apesar de limitações na existência de dados de campo que permitam realizar as verificações mais convenientes, as aplicações apresentadas para a faixa costeira da região de Aveiro demonstram a generalidade das conclusões agora apresentadas. As abordagens de vulnerabilidades e riscos para a costa aveirense confirmam a sensibilidade e fragilidade existentes. As campanhas de recolha de areias das praias de Aveiro demonstraram a grande dispersão de valores que se podem encontrar na caracterização do diâmetro médio dos sedimentos. Verificou-se a dificuldade de relacionar a dimensão média dos sedimentos com o clima de agitação. A forma dos perfis transversais na região de Aveiro demonstra alguma discrepância com as formas de equilíbrio propostas em modelo.

A avaliação do potencial de transporte sólido longitudinal resulta em valores elevados e revela a intensidade do clima de agitação da costa Noroeste portuguesa e a respectiva capacidade de transporte. No entanto, a metodologia de cálculo, dependente principalmente do clima de agitação e do ângulo de incidência da agitação com a costa, traduz alguma incerteza nos resultados finais.



A representação de diferentes configurações de equilíbrio da linha de costa e a modelação de cenários de evolução mostram que as capacidades de previsão são limitadas e revelam o trabalho que ainda há por desenvolver. São evidentes as dificuldades e limitações do conhecimento actual, incapaz de representar com rigor muitos dos problemas existentes. Diversas vezes, por dificuldade de aquisição de dados da costa Oeste portuguesa e concretamente da região de Aveiro, as aplicações realizadas não são as mais desejadas. Considera-se que os elementos topo-hidrográficos existentes são muito escassos, principalmente no que se refere a cotas submersas. É necessário promover a aquisição de dados.

### **7.3 Desenvolvimentos Futuros**

O número de temas abordados nesta dissertação foi elevado. Considera-se que desta forma é proporcionada uma visão global dos problemas, permitindo a respectiva interligação e relacionamento. No entanto, porque não foi possível aprofundar alguns dos temas, ficam em aberto diversos aspectos que interessará desenvolver no futuro.

Durante o trabalho desenvolvido sentiu-se dificuldade de acesso a informações importantes. Deve-se fomentar a disponibilização de dados à comunidade científica para que as diversas entidades relacionadas com os estudos dos problemas costeiros consigam de forma mais eficaz obter resultados válidos. Referem-se nomeadamente os registos de agitação, marés e ventos, bem como levantamentos batimétricos em áreas alargadas e com frequência que permita comparações de comportamentos no tempo.

A aplicação de matrizes de classificação de vulnerabilidades e riscos associáveis às acções energéticas do mar pode ser explorada com necessários cuidados. A utilização da proposta apresentada requer uma correcta ponderação de parâmetros. A capacidade de efectuar a avaliação dos parâmetros só pode ser conseguida com a experiência repetida em diversos locais, com diferentes características e com diferentes coeficientes de ponderação. São necessários testes e comparações ao longo do tempo de forma a validar a proposta.

Entende-se que a modelação é fundamental na compreensão dos fenómenos costeiros. A monitorização e modelação da costa continuam a ser um desafio para equipas de investigação internacionais e multidisciplinares. Devido à grande complexidade envolvida, é ainda limitada a capacidade de traduzir os comportamentos físicos em modelos numéricos. A modelação física

também pode ser um auxiliar precioso nesse campo, permitindo a comprovação de comportamentos pontuais e específicos.

Assim, a modelação numérica deve avançar em conjunto com a modelação física, para que os resultados dos dois tipos de modelos sejam reciprocamente comprovados. O modelo LTC ainda não simula o transporte transversal. O programa faz uma distribuição uniforme das variações de volumes em cada perfil transversal activo. Interessa avaliar o comportamento dos perfis transversais em situação de acreção e erosão (por exemplo, a barlamar e a sotamar de esporões ou de quebramares). Considera-se que há necessidade de aprofundar a investigação sobre a forma dos perfis transversais quando evoluem no tempo em situação persistente de défice ou ganho sedimentar.

A caracterização granulométrica das areias é um factor fundamental em numerosos conceitos. Praias com areias de diferente granulometria evoluem para diferentes formas de perfis transversais, com previsíveis consequências na configuração em planta. Como se verificou, as variações de tamanho dos grãos ao longo do perfil transversal e durante o ano modificam o nível de aplicação do modelo de previsão de erosão ou acreção. É importante concluir quais os valores representativos dos sedimentos que melhor caracterizam o comportamento das praias (sedimentos em suspensão, sedimentos da zona de rebentação, da zona entre marés ou de todo o perfil activo, etc.). A distribuição granulométrica nos perfis transversais e o comportamento de praias para diferentes curvas granulométricas são portanto, questões a aprofundar. Pretende-se prosseguir com as campanhas já realizadas para possibilitar uma base de análise mais significativa. Também devem ser efectuadas recolhas de amostras em zonas submersas e zonas altas da praia.

No modelo desenvolvido, a profundidade activa é caracterizada por um valor único para toda a costa. Por definição, a profundidade activa relaciona-se com o conjunto de ondas cuja altura apenas é excedida 12 h/ano. Será necessário avaliar se esta definição de perfil activo aplicada para cada onda tem validade. Importa saber até que profundidade do perfil transversal existem alterações de cotas para cada altura de onda e se essa profundidade é independente da forma do perfil transversal. A validação por medição da profundidade de fecho é um aspecto importante e que deve ser realizado na costa portuguesa. Para que o processo de estimativa da profundidade de fecho tenha validade, as campanhas de campo devem ser periódicas e corresponder a uma série de vários anos, facto que naturalmente dificulta a existência de valores medidos.

A inclinação da praia é um conceito que intervém em muitos aspectos da avaliação do transporte sedimentar e por isso merece também algum estudo. A previsão de inclinações da praia e a sua relação com o clima de agitação e granulometria das areias é importante. A normalização da definição do método de determinação da inclinação da praia é outro aspecto que deve evoluir no futuro.

A distribuição transversal dos sedimentos em transporte é admitida constante em numerosos modelos (incluindo o modelo desenvolvido neste trabalho), mas este facto traduz uma simplificação da realidade. A forma de rebentação das ondas influencia a distribuição transversal do transporte, geralmente com maiores volumes de transporte de sedimentos na zona da rebentação. A consideração de uma distribuição constante tem de ser reavaliada. O desenvolvimento no modelo de uma opção em que a distribuição de sedimentos seja efectuada por célula e não por perfil transversal poderá originar resultados significativamente diferentes. No futuro, essa opção deve permitir que a distribuição transversal corresponda a uma curva imposta em função do tipo de rebentação da ondulação.

Pelo carácter aleatório de muitos dos factores envolvidos, não é possível atingir através da modelação uma posição final de linha de costa como solução, mas possivelmente uma área provável para a sua localização. Devido a este facto, será então pouco lógico entrar com demasiados factores na definição da configuração da costa, sendo talvez mais importante a caracterização com rigor dos que são fundamentais nos fenómenos da evolução da linha de costa e a adopção criteriosa de cenários.

Existe ainda um vasto campo de investigação com todo o interesse de ser explorado.



**Referências Bibliográficas**

Abecasis, F., Castanho, J. P., Carvalho, J. R. (1957). “A Previsão das Características das Ondas do Mar”; Memória n.º 114, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 215 p.

Abecasis, F. (1997). “Caracterização Geral Geomorfológica e Aluvionar da Costa Continental Portuguesa”; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 9-24.

Ackers, C., White, W. R. (1973). “Sediment Transport: a New Approach and Analysis”; Journal of Hydraulics Division, ASCE, 99, pp. 2041-2060.

Almeida, A. B. (2003). “A Gestão do Risco em Sistemas Hídricos – Conceitos e Metodologias Aplicadas a Vales com Barragens”; 6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Cabo Verde, Vol. 3, pp. 647-661.

ANC (2003). Associação Nacional de Cruzeiros.  
<http://www.edinfor.pt/anc/ancfmares.html>.

Andrade, C. F., Freitas, M. C. (2002). “Climate Change in Portugal – Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project”; Chapter 6: Coastal Zones, Editors Santos, F.D., Forbes, K. e Moita, D., Gradiva, Lisbon, 456 p.

APDL (2002). Administração dos Portos do Douro e Leixões.  
[http://www.apdl.pt/html/fac\\_hist.html](http://www.apdl.pt/html/fac_hist.html).

Avilez-Valente, P., Veloso-Gomes, F. (1992). “Estudos de Agitação e Ressonância em Bacias Portuárias pelo Método dos Elementos Finitos – Aplicação ao Porto de Leixões (Portugal)”; Anais do XII Congresso Ibero Latino Americano Sobre Métodos Computacionais para a Engenharia, Editores M. I. G. Santos, A. M. Awruch e A. G. Groehs, Porto Alegre, RS, Brasil, Vol. 2, pp. 214-223.

Bagnold, R. A. (1966). “An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics”; Geological Survey Professional Paper, 422-1.

Baptista, P., Bastos, L., Bernardes, C., Taborda, R. (2004). “Large Scale Morphodynamics Characterisation of Exposed Sandy Beaches by DGPS”; Journal of Coastal Research, SI 39 (Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Coastal Symposium), Itajaí, Santa Catarina, Brazil.

Barata, A. M. G. O., Teles, M. J. B. S., Vieira, J. A. R. (1996). “Seleção de Ondas Representativas da Agitação Marítima para Efeito da Avaliação do Transporte Litoral na Costa de Aveiro”; Recursos Hídricos – Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Vol. 17 n.º 1, pp. 43-74.

Berek, E. P., Dean, R. G. (1982). “Field Investigation of Longshore Transport Distribution”; Proceedings of 18<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, Cape Town, Republic of South Africa, ASCE, Vol. II, pp. 1620-1639.

Berkhoff, J. C. W. (1972). “Computation of Combined Refraction-Difraction”; Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Vancouver, ASCE, pp. 471-490.

- Bernabeu, A. M., Medina, R., Vidal, C. (2003). "Wave Reflection on Natural Beaches: an Equilibrium Beach Profile Model"; *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n.º 57, pp. 577-585.
- Bettencourt, P. (1997). "Notas para uma Estratégia de Gestão da Orla Costeira"; *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 265-283.
- Birkemeier, W. A. (1985). "Field Data on Seaward Limit of Profile Change"; *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 111(3), pp. 598-602.
- Blankers, G. (1999). "Equilibrium Bays"; *MaST III - project SASME*, Delft University of Technology.
- Bodge, K. R. (1992). "Representing Equilibrium Beach Profiles with an Exponential Expression"; *Journal of Coastal Research*, Vol. 8, n. 1, pp. 47-55.
- Bodge, K. R., Kraus, N. C. (1991). "Critical Examination of Longshore Transport Rate Magnitude"; *Proceedings of Conference on Coastal Sediments '91*, ASCE, pp. 139-155.
- Booij, N. (1981). "Gravity Waves on Water with Non-uniform Depth and Current"; Ph.D. Thesis, Technical University of Delft, Delft, Países Baixos.
- Bruun, P. (1954). "Coastal Erosion and Development of Beach Profiles"; *Technical Memorandum n. 44*, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 79 p.
- Bruun, P. (1962). "Sea-level Rise as a Cause of Shore erosion"; *Journal of the Waterways and Harbors Division*, ASCE, Vol. 88, pp. 117-130.
- Carvalho, G. S., Granja, H. M. (1997). "Realismo e Pragmatismo: Uma Necessidade para o Aproveitamento dos Recursos Naturais da Zona Costeira (o Exemplo da Zona Costeira do Noroeste de Portugal)"; *Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal*, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 25-66.
- Carvalho, J. J. R., Barceló, J. P. (1966). "Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano - Contribuição Para o Seu Estudo"; *Memória n.º 290*, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 34 p.
- Castanho, J. (1966). "Rebentação das Ondas e Transporte Litoral"; *Memória n.º 275*, Ministério das Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 278 p.
- Coelho, C., Veloso-Gomes, F. (2003). "Wave Climate and Longshore Sediment Transport in the Northwest Portuguese Coast"; *Proceedings of 3<sup>rd</sup> IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics RCEM 2003*, Editors A. Sánchez-Arcilla and A. Bateman, Barcelona, Spain, pp. 1037-1048.
- Coelho, C., Veloso-Gomes, F. (2004). "Crossshore Beach Profile Models - Application to Aveiro Coast"; *Journal of Coastal Research*, SI 39 (Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Coastal Symposium), Itajaí, Santa Catarina, Brazil.
- Cowell, P. J., Hanslow, D. J., Meleo, J. F. (1999). "The Shoreface"; *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Australia, pp. 39-71.

CRL (1998). “Carta de Risco do Litoral. Trecho 2: Foz do Douro – Nazaré”; CEHIDRO – Centro de Estudos de Hidrossistemas, IST – Instituto Superior Técnico, INAG – Instituto da Água.

Cunha, P. P., Dinis, J. (1998). “Interacção entre as Operações de Dragagem no Porto da Figueira da Foz e a Dinâmica Sedimentar no Estuário do Mondego e Costa Adjacente (Portugal Central)”; Seminário Sobre Dragagens, Dragados e Ambientes Costeiros, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 27-45.

Dalrymple, R. A. (1992). “Prediction of Storm/Normal Beach Profiles”; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 118, n. 2, pp. 193-200.

Dean, R. G. (1977). “Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts”; Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report n. 12, University of Delaware, 45 p.

Dean, R. G. (1997). “Models for Barrier Island Restoration”; Journal of Coastal Research, 13, pp. 694-703.

Dean, R. G., Kriebel, D., Walton, T. (2002). “Cross-Shore Sediment Transport Processes”; Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-3, Engineer Manual 1110-2-1100, Walton, T. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 79 p.

Diogo, M. A. F. (2004). “Evolução da Linha de Costa da Praia da Vagueira”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 188 p.

Dolan, R., Fenster, M. S., Holme, S. J. (1991). “Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion”; Journal of Coastal Research, n. 7(3), pp. 723-744.

Edelman, T. (1972). “Dune Erosion during Storm Conditions”; Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, pp. 1305-1312.

Elliot, I., Clarke, D. (1989). “Temporal and Spatial Bias in the Estimation of Shoreline Rate-of-Change Statistics from Beach Survey Information”; Coastal Management, 17, pp. 129-156.

Engelund, F., Hansen, E. (1967). “A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams”; Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.

EUrosion (2003). “A European Initiative for Sustainable Coastal Erosion Management – Guidelines for Developing Local Information Systems – Study Cases of River Douro – Mondego Cape”; EUrosion Project, Universitat Autònoma de Barcelona, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Vol. 1, 182 p.

Ferreira, Ó. (1993). “Caracterização dos Principais Factores Condicionantes do Balanço Sedimentar e da Evolução da Linha de Costa entre Aveiro e o Cabo Mondego”; Tese de Mestrado, Universidade de Lisboa, 166 p.

Ferreira, Ó. (1998). “Morfodinâmica de Praias Expostas: Aplicação ao Sector Costeiro Aveiro-Cabo Mondego”; Tese de Doutoramento, Universidade do Algarve, 337 p.

Fredsøe, J., Deigaard, R. (1992). “Mechanics of Coastal Sediment Transport”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific, Singapore, 369 p.

Frijlink, H. C. (1952). "Discussion of Bed Load Movement Formulas of Kalinske, Einstein, and Meyer-Peter and Müller and Their Application to Recent Measurements of Bed Load Movement in the Rivers of Holland".

Gama, C., Taborda, R., Dias, J. M. A. (1997). "Sobreelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica ("Storm Surge"), em Portugal Continental"; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 131-149.

Goodwin, P., Wright, G. (1991). "Decisions Analysis for Management Judgement"; New York, Wiley.

Gornitz, V. M., Beaty, T. W., Daniels, R. C. (1997). "A Coastal Hazards Data Base for the U.S. West Coast"; Environmental Sciences Division Publication n.º 4590, ORNL/CDIAC-81, NDP-043C, 78 p.

Gourlay, M. R. (1968). "Beach and Dune Erosion Tests"; Delft Hydraulics Laboratory, Report n. M935/M936.

Hallermeier, R. J. (1978). "Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion"; Proceedings of 16<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, ASCE, Hamburg, Germany, pp. 1493-1512.

Hallermeier, R. J. (1981). "Terminal Settling Velocity of Commonly Occurring Sand Grains"; Sedimentology, Vol. 28, pp. 859-865.

Hanson, H., Kraus, N. C. (1989). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change"; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p.

Hanson, H., Kraus, N. C. (1991). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change"; Report 2, Workbook and System User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 431 p.

Hanson, H., Aarninkhof, S., Capobianco, M., Jiménez, J. A., Larson, M., Nicholls, R. J., Plant, N. G., Southgate, H. N., Steetzel, H. J., Stive, M. J. F., Vriend, H. J. (1999). "Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decadal Time Scales".  
<http://aqua.tvrl.lth.se/hh/pace/p3/p3.htm>.

Holman, R. A. (1986). "Extreme Value Statistic for Wave Run-up on a Natural Beach"; Coastal Engineering, n. 9, pp. 527-544.

HP (1981a). "Leixões - Cabo Mondego, Problemas Litorais"; Vol. 3 - Regime Litoral, Tomo 1 - Texto e Quadros, Hidrotécnica Portuguesa, Ministério dos Transportes e Comunicações, Direcção Geral de Portos.

HP (1981b). "Plano de Obras: Trecho Praia da Barra – Praia de Mira"; Projecto da Hidrotécnica Portuguesa, Direcção Geral de Portos, Leixões – Cabo Mondego: Problemas Litorais.

Hsu, J. R. C., Evans, C. (1989). "Parabolic Bay Shapes and Applications"; Proceedings Institution of Civil Engineers. 87. pp. 557-570.

Hsu, J. R. C., Silvester, R., Xia, Y. M. (1987). "New Characteristics of Equilibrium Shaped Bays"; Proceedings of 8<sup>th</sup> Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering. pp. 140-144.

Hughes, S. A. (1994). "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering"; World Scientific, River Edge.



- Hughes, M., Turner, I. (1999). "The Beachface"; Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Australia, pp. 119-144.
- IH (1990). "Roteiro da Costa de Portugal"; 2ª edição; Ministério da Defesa Nacional, Marinha, Instituto Hidrográfico, Lisboa.
- IHRH (1992). "A evolução fisiográfica da faixa costeira da região centro – que estratégias de gestão?"; IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos.
- IHRH (1993). "Plano de Aproveitamento da Zona Entre o Molhe Sul e a Ponte-Cais n.º 3 do Porto de Leixões"; IHRH – Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos.
- INAG (2002). Instituto da Água.  
[http://snirh.inag.pt/snirh/dados\\_base/main\\_nav\\_fr.html](http://snirh.inag.pt/snirh/dados_base/main_nav_fr.html).
- INE (2002). Instituto Nacional de Estatística.  
<http://www.ine.pt>.
- IPTM (2003). Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos – Delegação de Portos do Norte.  
<http://www.ipnorte.pt/p/ipn.htm>.
- Kamphuis, J. W. (1991). "Alongshore Sediment Transport Rate"; Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 117(6), pp. 624-641.
- Kamphuis, J. W. (2000). "Introduction to Coastal Engineering and Management"; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16, World Scientific, Singapore, 437 p.
- Kamphuis, J. W., Davies, M. H., Nairn, R. B., Sayao, O. J. (1986). "Calculation of Littoral Sand Transport Rate"; Coastal Engineering, n. 10, pp. 1-21.
- King, D., Galvin, C. J. (2002). "Coastal Sediment Properties"; Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-1, Engineer Manual 1110-2-1100, Walton, T. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 41 p.
- Klein, A. H. F., Vargas, A., Raabe, A. L. A., Hsu, J. R. C. (2003). "Visual Assessment of Bayed Stability with Computer Software"; Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam; Computers & Geosciences, n. 29, pp. 1249-1257.
- Komar, P. D. (1976). "Beach Processes and Sedimentation"; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 429 p.
- Komar, P. D., McDougal, W. G. (1994). "The Analysis of Exponential Beach Profiles"; Journal of Coastal Research, pp. 56-69.
- Kraus, N. C. (1992). "Engineering Approaches to Cross-Shore Sediment Processes"; Design and Reliability of Coastal Structures, Proceedings of the Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures, Venice, pp. 175-209.
- Kraus, N. C., Larson, M., Randall, A. W. (1998). "Depth of Closure in Beach-fill Design"; Coastal Engineering Technical Note – CETN II-40, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, 13 p.

- Kriebel, D. L., Kraus, N. C., Larson, M. (1991). "Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response"; Proceedings of Conference on Coastal Sediments '91, ASCE, pp. 557-571.
- Lakhan, V. C. (2003). "Advances in Coastal Modeling"; Elsevier Oceanography Series, 67, Editor V. C. Lakhan, 595 p.
- Leatherman, S. P., Yohe, G. W. (1996). "Coastal Impact and Adaptation Assessment"; Vulnerability and Adaptation Assessments – An International Handbook, Version 1.1, Editors R. Benioff, S. Guill and J. Lee, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 5.63-5.76, H.1-H.39.
- LNEC (1996). "Instalação de uma Monobóia para Descarga de Petróleo Bruto para a Refinaria do Porto, Caracterização das Condições Naturais – Relatório Final"; Relatório 172/96 – NPP, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Confidencial.
- Mashima, T. (1961). "Stable Configuration of Coastline"; Coastal Engineering in Japan, 4, pp. 47-59.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). "Formulas for Bed-Load Transport"; Report on the Second Meeting, International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm, pp. 39-64.
- Moore, B. D. (1982). "Beach Profile Evolution in Response to Changes to Water Level and Wave Height"; M. S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Delaware.
- Morais, C. C., Abecasis, F. (1978). "Storm Surge Effects at Leixões"; Memória n.º 503, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 23 p.
- Morang, A., Parson, L. E. (2002). "Coastal Morphodynamics"; Coastal Engineering Manual, Part IV, Coastal Geology, Chapter IV-3, Engineer Manual 1110-2-1100, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 86 p.
- Moreno, L. J., Kraus, N. C. (1999). "Equilibrium Shape of Headland-Bay Beaches for Engineering Design"; Proceedings of Coastal Sediments '99, ASCE, pp. 860-875.
- Nicholls, R. (1998). "Coastal Vulnerability Assessment for Sea-Level Rise: Evaluation and Selection of Methodologies for Implementation"; Technical Report TR 98002, Publication of Caribbean Planning for Adaptation to Global Climate Change (CPACC) Project, 39 p.
- Oliveira, I. B. M. (1968). "Estudo do Restabelecimento Artificial do Transporte Litoral Através da Embocadura da Ria de Aveiro"; Hidrotécnica Portuguesa (versão reduzida do original para efeitos do concurso a Professor Catedrático do candidato I. B. Mota Oliveira), 138 p.
- Oliveira, I. B. M. (1990). "Erosão Costeira no Litoral Norte: Considerações Sobre a Sua Génese e Controlo"; Actas do 1º Simpósio Sobre a Protecção e Revalorização da Faixa Costeira do Minho ao Liz, Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Porto, pp. 201-221.
- Oliveira, I. B. M. (1997). "Proteger ou Não Proteger ou Sobre a Viabilidade de Diferentes Opções Face à Erosão da Costa Oeste Portuguesa"; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 205-227.
- Pais-Barbosa, J., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (2003). "Indicators of a GIS-Based Aerial Images Analysis of the Portuguese Northwest Coastal Dynamics"; Proceedings of the Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management COASTGIS 03 - Integrating Information in Coastal Zone Management, Genova, Italy, 7 p.

Paixão, G. (1998). "Planeamento e Gestão de Dragagens Portuárias (Um Breve Estudo no Âmbito da DGPNTM-Portugal)"; Seminário Sobre Dragagens, Dragados e Ambientes Costeiros, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 7-20.

PBH Minho (2001). "Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Minho"; Síntese da Análise e Diagnóstico da Situação Actual, Definição de Objectivos, Proposta de Medidas e Acções, Prognóstico para os Cenários de Desenvolvimento, Programação Física e Financeira, Regulamento.

Pelnard-Considère, R. (1956). "Essai de Theorie de l'Evolution des Forms de Rivages en Plage de Sable et de Galets"; Fourth Journees de l'Hydraulique, les Energies de la Mer, Question III, Rapport n. 1, pp. 289-298.

Pereira, L. V. (2000). "Evolução de Curto Prazo da Linha de Costa entre a Costa Nova e Poço da Cruz"; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.

POOC (1998). "Plano de Ordenamento da Orla Costeira – Ovar- Marinha Grande"; Estudo Prévio de Ordenamento, Vol. 1; Modelo de Ordenamento e Desenvolvimento.

Pureza, F. G., Araújo, A. M. (1956). "Granulometria e Minerais Pesados das Areias das Praias de Entre o Porto e a Figueira da Foz"; Separata de «Memórias e Notícias», n.º 41, Coimbra.

Rebelo, F. (1993). "A Representação do Quaternário na Cartografia Geológica e Geomorfológica Portuguesa"; O Quaternário em Portugal, Balanço e Perspectivas, Associação Portuguesa para o Estudo do Quaternário, Edições Colibri, Lisboa, pp. 29-34.

Rebelo, J. A. (1999). "As Cartas Geológicas ao Serviço do Desenvolvimento". Instituto Geológico e Mineiro.  
[http://www.igm.pt/edicoes\\_online/diversos/cartas/indice.htm](http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/cartas/indice.htm).

Rijn, L. C. (1984). "Sediment Transport: Part I – Bed Load Transport, Part II – Suspended Load Transport, Part III – Bed Forms and Alluvial Roughness"; Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 110, n.º 10 pp. 1431-1456, n.º 11 pp. 1613-1641, n.º 12 pp. 1733-1754.

Rijn, L. C. (1989). "Handbook Sediment Transport by Currents and Waves"; Report H461, Delft Hydraulics.

Roelvink, J. A., Brøker, I. (1993). "Cross-shore Profile Models"; Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Coastal Engineering, n. 21, pp. 163-191.

Rosati, J. D., Walton, T., Bodge, K. (2002). "Longshore Sediment Transport"; Coastal Engineering Manual, Part III, Coastal Sediment Processes, Chapter III-2, Engineer Manual 1110-2-1100, Morang, A. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 113 p.

Rua, J. (2002). "A Actividade do Porto de Aveiro e a Erosão Costeira a Sul da Barra".  
<http://www.portodeaveiro.pt/Pressreleases/ArtigoAreias1b.htm>.

Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Komar, P. D., McDougal, W. G. (1997). "Extreme Waves and Coastal Erosion in the Pacific Northwest"; Ocean Wave Measurement and Analysis, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium, Waves '97, pp. 947-961.

Schoonees, J. S., Theron, A. K. (1993). "Review of the Field Data Base for Longshore Sediment Transport"; Coastal Engineering, n. 19, pp. 1-25.

- Short, A. D. (1999). "Wave-Dominated Beaches"; Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics, Edited by Andrew D. Short, University of Sydney, Australia, pp. 173-203.
- Silva, P. (2001). "Contribuição para o Estudo da Dinâmica Sedimentar em Regiões Costeiras"; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 322 p.
- Silvester, R., Hsu, J. R. C. (1997). "Coastal Stabilization"; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 14, World Scientific, Singapore, 578 p.
- Simeone, U., Tessari, U., Gabbianelli, G., Schiavi, C. (2003). "Sea Storm Risk Assessment in the Ravenna Littoral (Adriatic Sea, Northern Italy)"; Proceedings of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment MEDCOAST 03, Ravenna, Italy, Editor Erdal Özhan, Vol. 3, pp. 2223-2234.
- Simm, J., Cruickshank, I. (1998). "Construction Risk in Coastal Engineering"; Thomas Telford, London, 495 p.
- Smith, J. (2003). "Surf Zone Hydrodynamics"; Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics II-4, Engineer Manual 1110-2-1100, Vincent, L. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 40 p.
- Sorensen, R., Thompson, E. F., Briggs, M., Chasten, M. A., Lillycrop, L. (2003). "Harbor Hydrodynamics"; Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydrodynamics II-7, Engineer Manual 1110-2-1100, Vincent, L. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 98 p.
- Soulsby, R. (1997). "Dynamics of Marine Sands"; A Manual for Practical Applications, Thomas Telford, London, 249 p.
- Soulsby, R., Whitehouse, R. J. S. W. (1997). "Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments"; Proceedings of Pacific Coasts and Ports '97 Conference, Christchurch, New Zealand, 1, pp 149-154.
- Sunamura, T. (1984). "Quantitative Prediction of Beach-Face Slopes"; Geological Society of America Bulletin, 95, pp. 242-245.
- Sweers, K. B. (1999). "Equilibrium Bays - A Numerical Study after the Behaviour of Equilibrium Bays"; MaST III - project SASME, Delft University of Technology.
- Taborda, R., Dias, J. M. A. (1992). "Análise da Sobreelevação do Nível do Mar de Origem Meteorológica Durante os Temporais de Fevereiro/Março de 1978 e Dezembro de 1981"; Geonovas n.º 1 Especial Geologia e Ambiente, pp. 89-97.
- Taussik, J., Gilbert, Y. (2002). "Communication in Coastal Management: Scientists and Managers"; Proceedings of 6<sup>th</sup> International Symposium LITTORAL 2002 - The Changing Coast, Porto, Portugal, Eurocoast/EUCC, Vol. 1, pp. 3-13.
- Thieler, E. R., Hammar-Klose, E. S. (1999). "National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U. S. Atlantic Coast"; U. S. Geological Survey Open-File Report 99-593, United State Geological Survey (USGS).  
<http://pubs.usgs.gov/of/of99-593>.

- Trigo-Teixeira, A., Matos, J., Pimentel, C., Pinheiro, J. (2002). "A Map of Land at Risk on the Portuguese Coast"; International Workshop of Good Practices on Coastal Zone Management and Coastal Defence, Porto.
- Tsuchiya, Y. (1982). "The Rate of Longshore Sediment Transport and Beach Erosion Control"; Proceedings of 18<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference, Cape Town, Republic of South Africa, ASCE, Vol. II, pp. 1326-1334.
- Tucker, M. J. (1991). "Waves in Ocean Engineering: Measurement, Analysis and Interpretation"; Ellis Horwood, New York.
- Valle, R., Medina, R., Losada, M. A. (1993). "Dependence of Coefficient K on Grain Size"; Technical Note N. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119 (5), pp. 568-574.
- Veloso-Gomes, F. (1995a). "Exutor Submarino de Matosinhos - Estudo do Clima Marítimo - Regime Médio em Condições de Verão"; Memória - Resumo do Estudo Realizado, 67 p.
- Veloso-Gomes, F. (1995b). "Fenómenos de Alteração e Deformação da Agitação na Propagação em Direcção à Costa – Interacção Agitação/Taludes"; 1<sup>a</sup> edição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 76 p.
- Veloso-Gomes, F., Papadatos, M. (1995). "Metodologia para a Quantificação da Vulnerabilidade e Risco de Exploração das Orlas Costeiras às Acções Energéticas do Mar."; Ed. A.B.R.H. Recife, Brasil.
- Veloso-Gomes, F. (1996). "Reflexões sobre a Vulnerabilidade e Risco de Exposição das Orlas Costeiras às Acções Energéticas do Mar"; Lição de Síntese das Provas de Agregação em Engenharia Civil - Sumário Pormenorizado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 59 p.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (1997). "A Opção "Protecção" para a Costa Oeste Portuguesa"; Colectânea de Ideias Sobre a Zona Costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, pp. 163-190.
- Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (1999). "Reconstruction and Repair of Portuguese Coastal Defence Structures"; Coastal Structures '99, Edited by Losada, I. J., Vol. 2, pp. 977-984.
- Veloso-Gomes, F., Avilez-Valente, P., Pais das Neves, L. (2000). "Empreitada de Concepção, Projecto e Construção das Obras Necessárias à Melhoria das Acessibilidades e das Condições de Segurança da Barra do Douro"; Relatório de Apreciação das Propostas Submetidas ao Concurso, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Villaverde, J. M. M. (1998). "Hidrodinámica del Perfil de Playa"; Colección Señor nº 21, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 181 p.
- Vincent, L., Bratos, S., Demirbilek, Z., Weggel, J. R. (2002). "Estimation of Nearshore Waves"; Coastal Engineering Manual, Part II, Coastal Hydraulics, Chapter II-3, Engineer Manual 1110-2-1100, Demirbilek, Z. (editor), U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 41 p.
- Vicente, C. M., Clímaco, M. (2003). "Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de um Modelo Numérico"; Informação Técnica Hidráulica ITH 42, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 167 p.

Wang, P., Ebersole, B. A., Smith, E. R. (2002). "Longshore Sand Transport – Initial Results from Large-Scale Sediment Transport Facility"; ERDC/CHL CHETN-II-46, US Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

WCU (2003). Western Carolina University - Coastal Hazards Information Clearinghouse.  
<http://coastalhazards.wcu.edu>.

Woodroffe, C. D. (2003). "Coasts – Form, Process and Evolution"; Cambridge University Press, 623 p.

Wright, L. D., Short, A. D. (1984). "Morphodynamic Variability of Beaches and Surf Zones. A Synthesis"; Marine Geology, 56, pp. 92-118.

Yasso, W. E. (1965). "Plan Geometry of Headland Bay Beaches"; Journal of Geology, Vol. 73, pp. 702-714.

Zheng, J., Dean, R. G. (1997). "Numerical Models and Intercomparisons of Beach Profile Evolution"; Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam; Coastal Engineering, n. 30, pp. 169-201.